

VŠB-Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení



Měření charakteristiky plunžrového čerpadla

Measurement of Plunger Pump Characteristic

Vpracoval:

Vedoucí bakalářské práce:

Tibor Tomášek

Ing. Daniel Himr, Ph.D.

Ostrava 2013

Zadání bakalářské práce

Student: **Tibor Tomášek**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení
Téma: **Měření charakteristiky plunžrového čerpadla**
Measurement of Plunger Pump Characteristic

Zásady pro vypracování:

Vpracujte obecnou literární rešerši čerpadel (základní rozdělení, oblasti použití, výhody, nevýhody,...), zvláštní péči věnujte části o plunžrových čerpadlech.

Na základě vyhodnocení rešerše popište způsob měření a vyhodnocení důležitých parametrů plunžrového čerpadla.

Proveďte měření na výukovém zařízení v laboratoři Katedry hydromechaniky a hydraulických zařízení.

Seznam doporučené odborné literatury:

[1] BRADA, K., BLÁHA, J.: *Čerpací technika*. ČVUT Praha, 1991. ISBN 80-01-00686-7

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Daniel Himr, Ph.D.**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou (bakalářskou) práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové (bakalářské) práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

Ostravě dne 20. 5. 2013

Tibor Temiáš

podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20. 5. 2013

Tibor Tomášek
.....

Podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Tibor Tomášek

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Na Bělidle 8, Ostrava 1

Abstrakt

Práce se zabývá popisem funkce čerpadel, jejich všeobecným rozdělením a stručným popisem, porovnáním výhod a nevýhod a jejich využitím v praxi se zvláštním zaměřením na plunžrová čerpadla. Dále specifikuje jejich charakteristické vlastnosti, způsob měření těchto vlastností a vyhodnocení důležitých parametrů čerpadel. V závěru práce je postup měření základních charakteristik plunžrového čerpadla na školním zařízení FM53 firmy Armfield.

Abstract

This work describes the function of pumps, their general distribution and brief description, comparing the advantages and disadvantages and their use in practice, with a particular focus on the plunger pump. Furthermore, specifying the characteristics, the method of measurement of these properties and the evaluation of the important parameters of pumps. In conclusion, the procedure of measuring the basic characteristics of the pump plunger on school equipment companies Armfield FM53.

Klíčová slova

Hydrostatické čerpadla, Hydrodynamické čerpadla, Rozdělení čerpadel, Plunžrové čerpadlo, Základní charakteristika, Měření čerpadla.

Keywords

Hydrostatic Pumps, Hydrodynamic pumps, Distribution pumps, Plunger pumps, Basic characteristics, Measurement pump.

Poděkování

Děkuji panu Ing. Danielu Himrovi, Ph.D. a paní doc. Ing. Sylvě Drábkové, Ph.D. za rady a pomoc při vypracování této práce.

Obsah

Úvod.....	10
1. Čerpadla	11
1.1. Základní rozdělení.....	11
1.2. Hydrostatická čerpadla	12
1.2.1. Zubová čerpadla s čelním ozubením	12
1.2.2. Zubové čerpadlo s vnitřním ozubením	13
1.2.3. Vřetenová (šroubová, šneková) čerpadla.....	14
1.2.4. Lamelové čerpadlo.....	14
1.2.5. Pístová čerpadla	15
1.2.6. Pístová radiální čerpadla	17
1.2.7. Čerpadlo s diagonálními písty	18
1.2.8. Pístová axiální čerpadla	19
1.2.9. Plunžrové čerpadlo	21
1.2.10. Membránová čerpadla	25
1.2.11. Peristaltické (Hadicová) čerpadla	26
1.3. Hydrodynamická čerpadla	27
1.3.1. Obecný popis	27
1.3.2. Typické konstrukce hydrodynamických čerpadel	28
1.3.2.1. <u>Míchací čerpadla</u>	28
1.3.2.2. <u>Axiální čerpadla</u>	29
1.3.2.3. <u>Oběhové čerpadlo</u>	29
1.3.2.4. <u>Kalová čerpadla</u>	30
1.4. Speciální čerpadla	31
1.4.1. Vodní ejektory	31
1.4.2. Vodní trkače.....	32

1.4.3.	Mamutová čerpadla.....	33
2.	Způsoby měření a vyhodnocení parametrů čerpadel	33
2.1.	Základní parametry čerpadla.....	33
2.2.	Zkoušení čerpadla	34
2.2.1.	Měření průtoku	34
2.2.2.	Měření dopravní výšky	37
2.2.3.	Měření tlaků.....	38
2.2.4.	Měření příkonu	42
2.2.5.	Účinnost čerpadla	42
2.2.6.	Měření otáček	42
3.	Měření charakteristiky čerpadla.....	43
3.1.	Popis měřícího zařízení	43
3.2.	Měření charakteristiky plunžrového čerpadla.....	44
3.2.1.	Teorie	44
3.2.2.	Postup měření	45
3.2.3.	Výsledky	45
3.3.	P-V diagram	45
3.3.1.	Teorie	46
3.3.2.	Postup měření	46
3.3.3.	Výsledky	46
3.4.	Objemová účinnost.....	47
3.4.1.	Teorie	47
3.4.2.	Postup měření	48
3.4.3.	Výsledky	48
	Závěr	50
	Seznam použité literatury	51

Seznam použitých veličin

H	Výška	[m]
P_V	Výkon	[W]
P_P	Příkon	[W]
Q	Průtok	[m ³ ·s ⁻¹]
V	Objem	[m ³]
Y	Měrná energie	[J·kg ⁻¹]
n	Otáčky	[s ⁻¹]
p	Tlak	[Pa]
η	Účinnost	[1]
ρ	Měrná hmotnost	[kg·m ⁻³]

Úvod

Nejpoužívanějším energetickým a pracovním zařízením jsou hydraulické stroje, které bývají součástí různých technologických zařízení, sloužících k různým účelům, nejenom ve strojírenském, energetickém, chemickém a potravinářském průmyslu ale i v dalších oblastech lidské činnosti. V dnešní době mají hydraulické stroje vysokou účinnost při poměrně malé hmotnosti stroje. Vzhledem k rozsahu požadavků, které jsou kladeny na hydraulické stroje, jsou velké i jejich rozsahy výkonů, kdy například u lékařských mikrohydraulických strojů jsou to desítky wattů, u velkých vodních turbín dosahují výkony až k 1000 MW. Hydraulické systémy obsahují kromě hydraulických strojů i armatury, potrubí a zařízení měřící, řídicí a diagnostická. Funkčnost hydraulických strojů je závislá na mazacích, chladicích a ohřívacích soustavách a dalších komponentech hydraulického systému.

Mezi hydraulické stroje se řadí čerpadla (hydrogenerátory), hydromotory, turbíny, hydraulické převody a čerpadlové turbíny. Převážná většina hydraulických strojů pracuje na principu hydrostatickém nebo hydrodynamickém. Čerpadla, jakož to hydraulické stroje, slouží jak pro dopravování a zvedání kapaliny, tak i pro zvyšování její tlakové energie. Princip čerpacího systému je vyobrazen na obrázku (*Obr. 1. 1 - Čerpací systém*), kde čerpadlo dopravuje kapalinu ze sací nádrže přes sací a výtlačné potrubí až do výtlačné nádrže. Na začátku sacího potrubí bývá umístěn filtr pro zachycení nečistot v kapalině. Tento systém se skládá z potrubního řádu a z čerpadla. Čerpadlo je zde energeticky aktivní složkou, která dodává kapalině potřebnou energii pro přemístění, a potrubní řád je pasivní složkou, ve které se energie dopravované kapaliny spotřebovává.



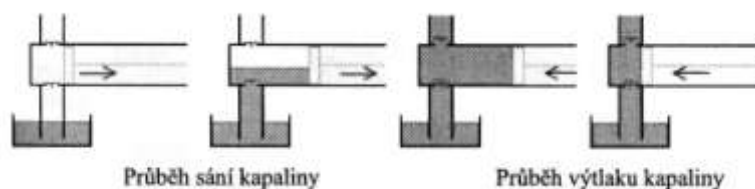
Obr. 1. 1 - Čerpací systém [3]

1. Čerpadla

1.1. Základní rozdělení [1], [3]

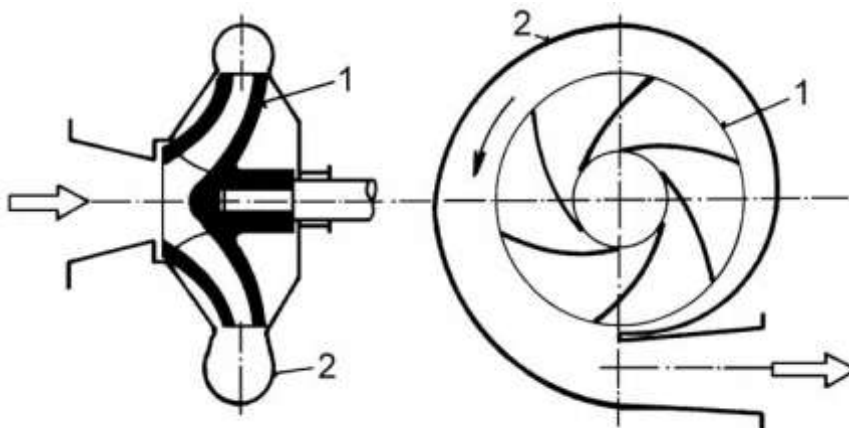
Podle toho jakým způsobem se vyvozuje čerpací účinek, se čerpadla rozdělují na tyto tři hlavní skupiny:

- Čerpadla hydrostatická (objemová): Tato čerpadla pracují na způsobu přímé přeměny energie přivedené do čerpadla, kde se v jeho pracovním prostoru přímo přeměňuje dále na energii tlakovou (potenciální). Například píst poháněný motorem nejprve nasaje kapalinu do pracovního prostoru, tu poté vytlačí ven a vzniká tlaková energie. Tato přímá přeměna nám dává vysokou účinnost u těchto čerpadel.

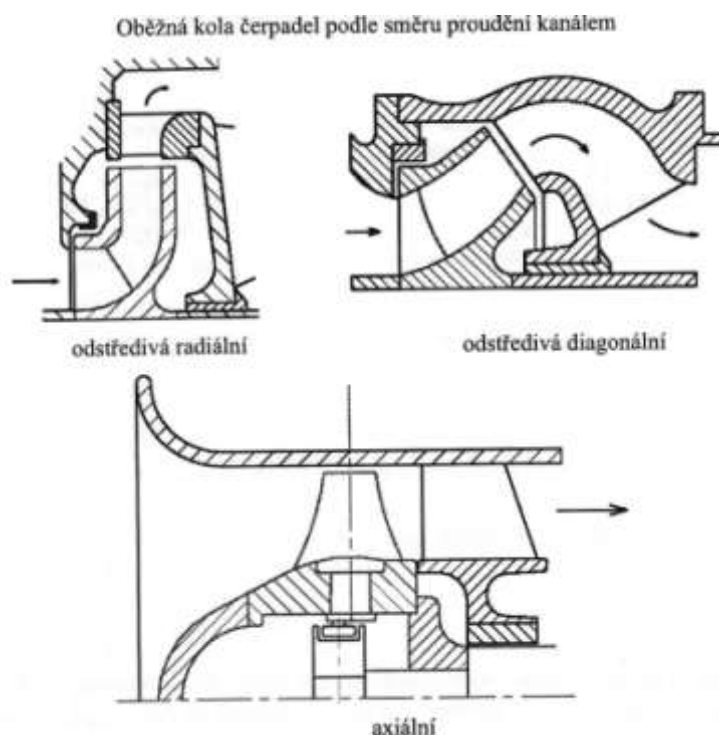


Obr. 2. 1 - Princip funkce [3]

- Čerpadla hydrodynamická: Tato čerpadla pracují s nepřímou změnou energie. Mechanická energie přiváděná na hřídel čerpadla se mění na kinetickou energii (nabírá na rychlosti) v oběžném kole 1. Dále ve výtlačném hrdle čerpadla se podíl kinetické mění na tlakovou energii a kapalina odchází s nezbytně nutnou rychlostí s převažující tlakovou energií. Nepřímá změna energie u této skupiny čerpadel způsobuje nižší celkovou účinnost a také vyšší ztráty než u čerpadel hydrostatických. (2 – Spirální skříň)



Obr. 2. 2 - Hydrodynamické čerpadlo [9]



Obr. 2. 3 - Oběžná kola [3]

- Čerpadla speciální: Využívají různých principů ke zvýšení energie kapaliny procházející čerpadlem. Patří zde například čerpadla mamutová, zdvižná, vodní trkače nebo ejektory.

1.2. Hydrostatická čerpadla [1], [2], [3]

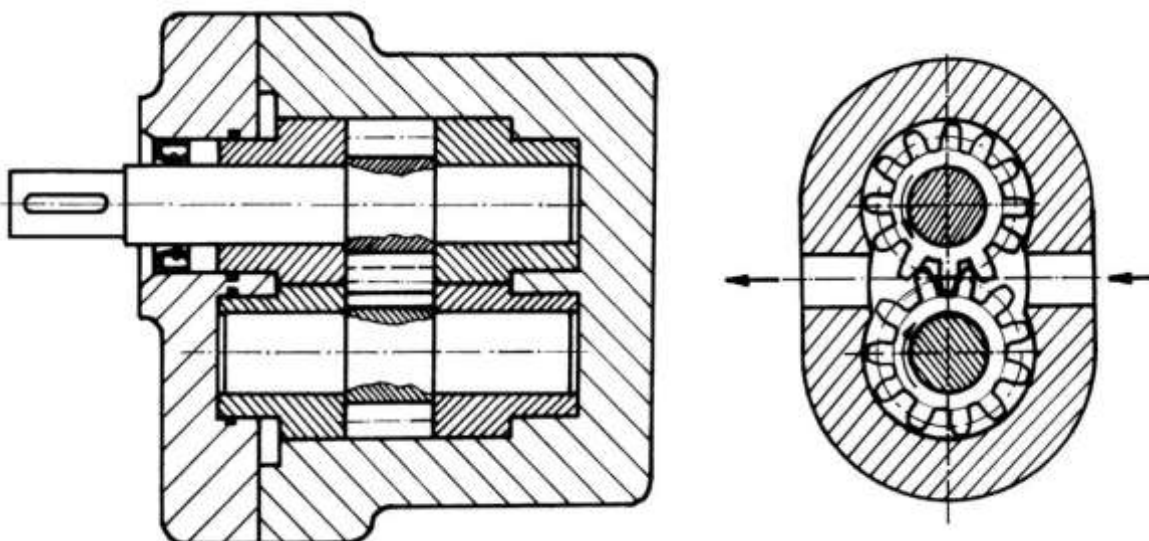
Dělí se na rotační a s kmitavým pohybem

- **Rotační čerpadla**: Dopravují kapalinu otáčivým pohybem činné části rotoru.

1.2.1. Zubová čerpadla s čelním ozubením [1], [2], [3]

Stále jedny z nejrozšířenějších hydrostatických strojů s rotačním pracovním pohybem. Při rotačním pohybu se v místě jejich vycházení ze záběru otevrou zubové mezery, přes které se kapalina dopravuje. Používají se i jako motory (mají bezventilový rozvod kapaliny) ale jen zřídka. Jsou vyžadovány u mobilních hydraulických zařízení. Mají jednoduchou konstrukci, nízkou cenu a dobrou samonasávací schopnost. Mají vysoký měrný výkon a jsou vhodné pro těžké provozní podmínky. Používají se pro přečerpávání topných i mazacích olejů.

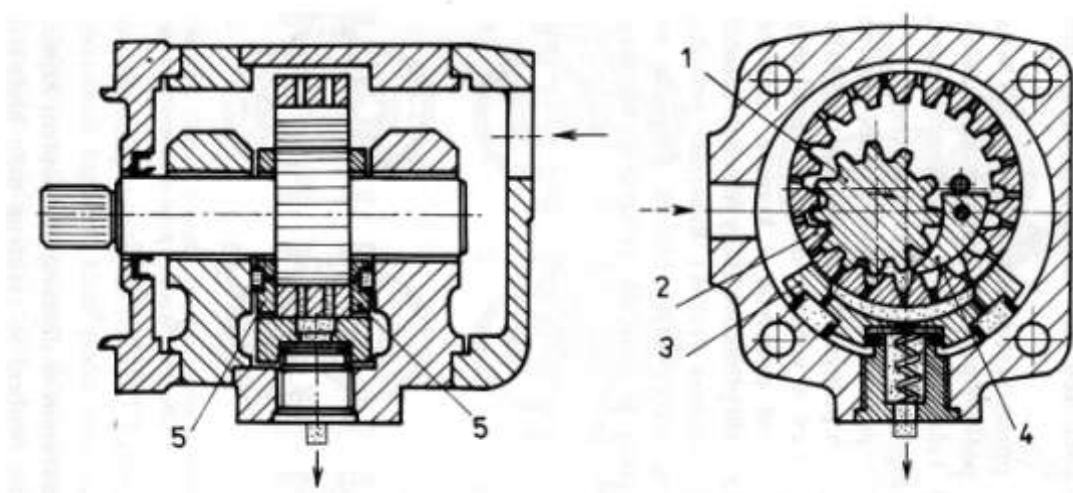
Nevýhodou těchto čerpadel je, že nejsou regulovatelná, mají konstantní geometrický objem. Nejsou vhodná pro nízké otáčky, jsou velmi hlučná a mají vysoké pulsace průtoků.



Obr. 2. 4 - Zubový stroj s vnějším ozubením [11]

1.2.2. Zubové čerpadlo s vnitřním ozubením [1], [2], [3]

Čerpadlo, jehož ozubené kolo 1 pohání věnec s vnitřním uložením 2, který je volně uložený. Vnitřní prostor věnce navazuje na sání. Opěrný segment 3 přitlačuje věnec 2 k ozubenému kolu 1 a krycí ostruže 4 silou, která je samočinně řízená tlakem kapaliny na vstupu. Pouzdra 5 vymezují silou axiální vůle v záběrové oblasti. Stejně jako zubové čerpadlo s vnějším ozubením má malý zástavný prostor, vysoký měrný výkon a také je vhodné pro náročnější provozní podmínky. Ale oproti němu má vyšší samonasávací schopnost, menší pulsace a velmi tichý chod. Toho je odsaženo vlivem menšího škodlivého prostoru.

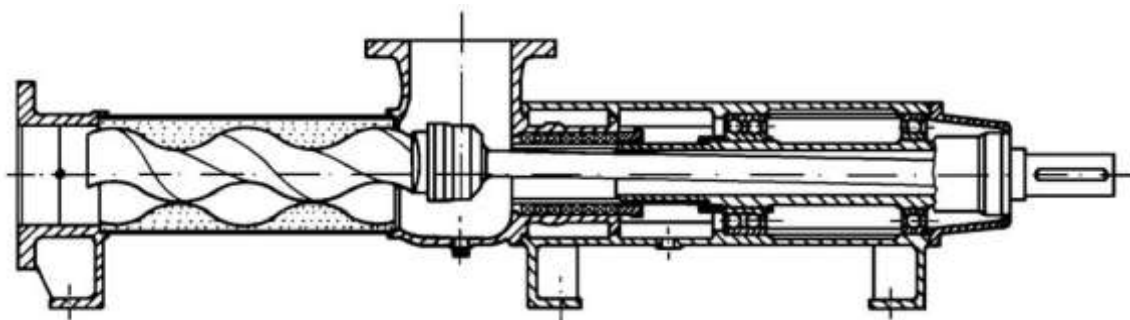


Obr. 2. 5 - Zubový stroj s vnitřním ozubením [1]

1.2.3. Vřetenová (šroubová, šneková) čerpadla [1], [2], [3]

Vřeteno jako čerpadlo se používá již od pradávna (Archimédes) ve formě šneku, který je umístěn v polootevřeném krytu (žlabu). Stroje s polootevřeným závitovým vřetenem mají kapalinovou náplň závitů přerušovanou atmosférou a jsou rovnotlaké. Vyrábějí se jednovřetenová, dvouvřetenová, třívřetenová i více vřetenová. Jednovřetenová čerpadla mají účinnost kolem 80 %, jsou ekologicky nezávadná, mohou být použita i pro velmi vysoké tlaky. Třívřetenová čerpadla dosáhnou až 90 % účinnosti. Užívají pro regulaci vodních i parních turbín. V naftovém průmyslu se uplatňují pětivřetenová čerpadla do průtoku téměř $400 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Vřetenová čerpadla se používají pro nejnižší měrné energie tedy nejmenší rozdíly geodetických hladin. Mají reverzibilní chod, takže se dají použít i jako motory. Díky svému velmi tichému chodu a průtoku bez pulsací se využívají i ve zdravotnických zařízeních a také lodích. Mají jednoduchou konstrukci a velkou spolehlivost. Můžou přepravovat velmi viskózní kapaliny s pevnými příměsemi. Jejich nevýhodou je nemožnost regulace geometrického objemu a u těsnějších závitů náročnost jejich výroby.

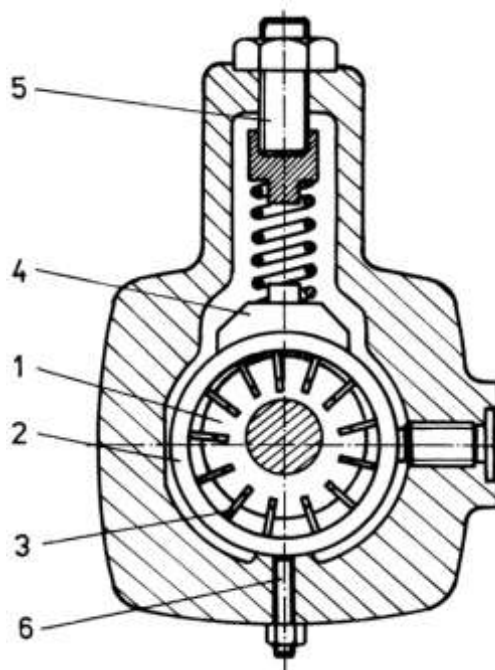


Obr. 2. 6 - Jednovřetenové čerpadlo [11]

1.2.4. Lamelové čerpadlo [1], [2], [3], [4]

Základní princip funkce lamelového čerpadla spočívá v tom, že v rotoru jsou vsazeny lamely, ty se při otáčení ve statoru, který má eliptický tvar, vysouvají a zasouvají celkem dvakrát během jedné otáčky. Jakmile se lamely vysouvají při rotaci, tak se prostor mezi nimi plní vodou z přívodního kanálu a když se opět zasouvají, kapalinu vytlačují do výtlačného kanálu. Přívodní a výtlačný kanál se nacházejí v boční stěně statoru a musí být odděleny krycím můstkem, který musí být větší, než je rozteč lamel kvůli snížení objemových ztrát. Pokud má stator kruhový tvar, lamely se vysunou a zasunou pouze jednou. Lamely mohou být elastické.

Tato levná a nenáročná, samonasávací čerpadla s elastickými lamelami se využívají v chemickém průmyslu. Lamelová čerpadla jsou oproti zubovým podstatně lehčí ale náročnější na výrobu vzhledem k požadované přesnosti. Kromě chemického průmyslu se jich využívá v potravinářství, ve stavebních strojích a pro nízko viskózní kapaliny. Mají regulovatelný geometrický objem a dodávají rovnoměrně průtok. Vlivem tření o stěny statoru dochází k opotřebení lamel, jejich výměna je ale snadná. Jsou velmi citlivá na různé nečistoty.



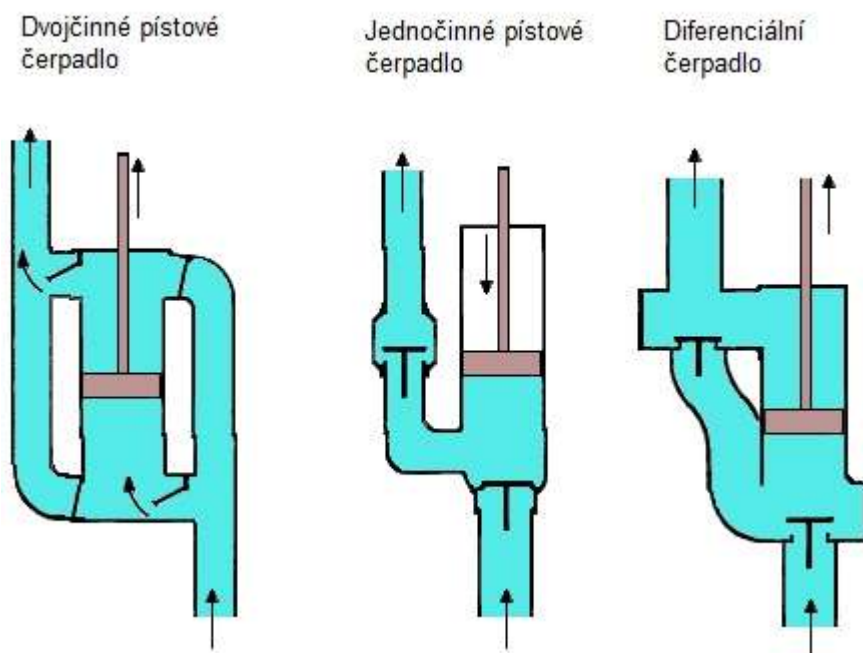
Obr. 2. 7 - Lamelové čerpadlo: 1 - rotor, 2 - stator, 3 - lamela, 4 - opěrka, 5 - regulační šroub, 6 – narážka
[11]

- **Čerpadla s kmitavým pohybem:** Dopravují kapalinu kmitavým vratným pohybem činné části motoru.

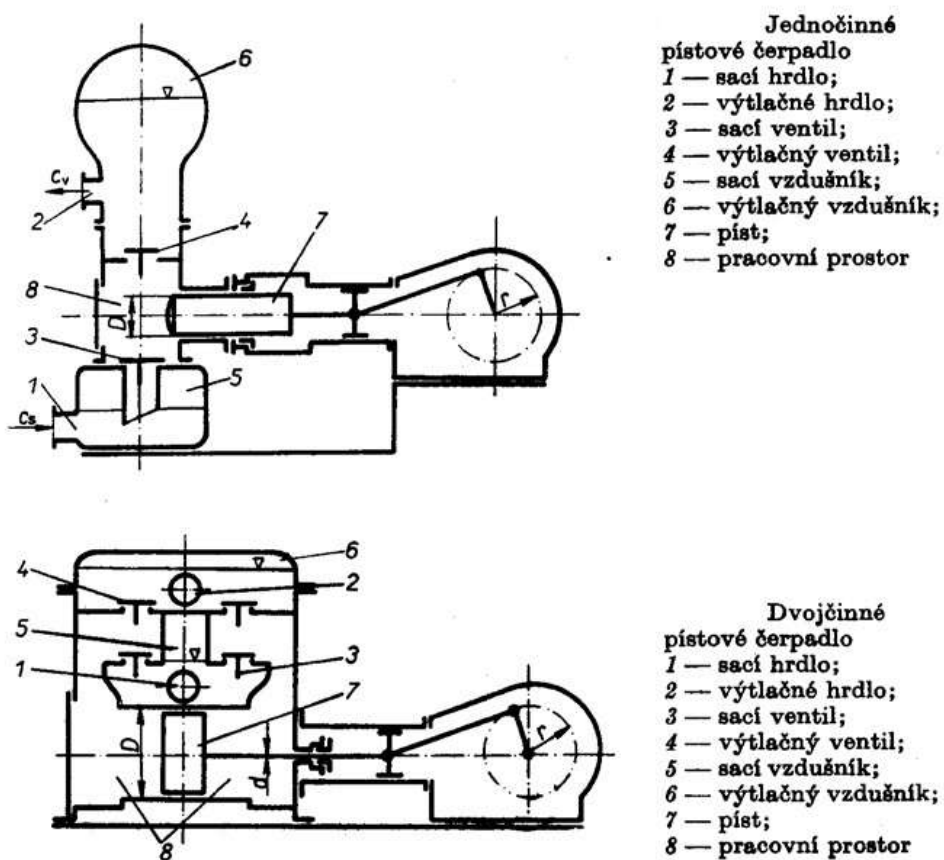
1.2.5. Pístová čerpadla [1], [2], [3], [4], [8]

Princip fungování pístového čerpadla byl vysvětlen v úvodním rozdělení čerpadel. V popisu hydrostatických čerpadel byl použit jako příklad spolu s obrázkem jeho funkce (Obr. 2. 1 - *Princip funkce*). Vysunutí pístu nasaje kapalinu do pracovního prostoru, jeho následné zasunutí do válce vytlačí kapalinu ven z válce. Takto funguje jednočinné pístové čerpadlo (na obrázku 2.8 uprostřed). Dvojčinná pístová čerpadla jsou odlišná od jednočinných tím, že pracovní prostor za pístem je také využíván k nasávání a vytlačování kapaliny, čímž zajišťuje rovnoměrnost dopravy kapaliny a větší účinnost. Dále se využívá diferenciálního čerpadla (na obrázku 2.8 vpravo), to pracuje podobně s tím rozdílem, že při vytlačování kapaliny z pracovního prostoru před pístem ji dopravuje zároveň do prostoru

za pístem a při nasávání kapaliny do prostoru před pístem, kapalinu, která se nachází za pístem, vytlačuje.



Obr. 2. 8 - Provedení pístových čerpadel [9]



Obr. 2. 9 - Popis pístových čerpadel []

Výhodou je schopnost pracovat s velmi vysokými tlaky, můžou čerpat jak čirá média, tak i kaly s určitým obsahem pevných látek a média s nízkou viskozitou. Mají také skvělé mazací schopnosti. Jejich nevýhodou je třeba teplotní rozmezí, nejsou vhodná pro vysoké teploty, mají silně pulzující průtok i výstupní tlak a těsnění se rychle opotřebovává. Jejich škála použití je velická, od potravinářského průmyslu, přes vysokotlaké mazací a hydraulické systémy až po čerpání plynů a komplikovaných kapalin jakou je tmel, inkoust nebo plastické mazivo.

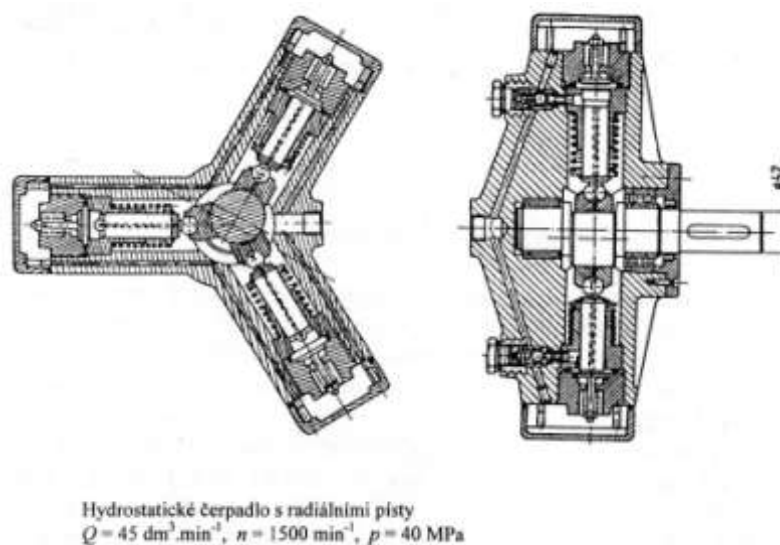
1.2.6. Pístová radiální čerpadla [1], [2]

Písty čerpadla působí kolmo k ose otáčení hřídele. Zpravidla se vyrábějí s počtem pístů 3, 5, 7, 9 a to buď s konstantním geometrickým objemem, nebo plynule měnitelným.

Dělí se na dvě základní varianty podle kinematiky pístů:

- Píst pouze kmitá
- Píst kmitá a rotuje.

V prvním případě jsou písty vedeny ve statoru. Na obrázku 1.9 je příklad takového stroje. Zde výstředník hnacího hřídele působí na písty prostřednictvím klouzátek s kulovým kloubem. Třecí plochy klouzátek jsou mazány tlakovým olejem, přiváděným z činného prostoru otvorem v pístu. Sání čerpadla ústí do skříně čerpadla. Při sacím zdvihu je píst vysouván z válce pružinou, zajišťující silový styk klouzátko s výstředníkem. V druhém případě jsou písty vedeny v rotoru. Tento typ se používá převážně u hydraulických mechanismů tvářecích strojů a těžkých manipulátorů. Pracují v obou směrech, používají se i jako hydromotory.

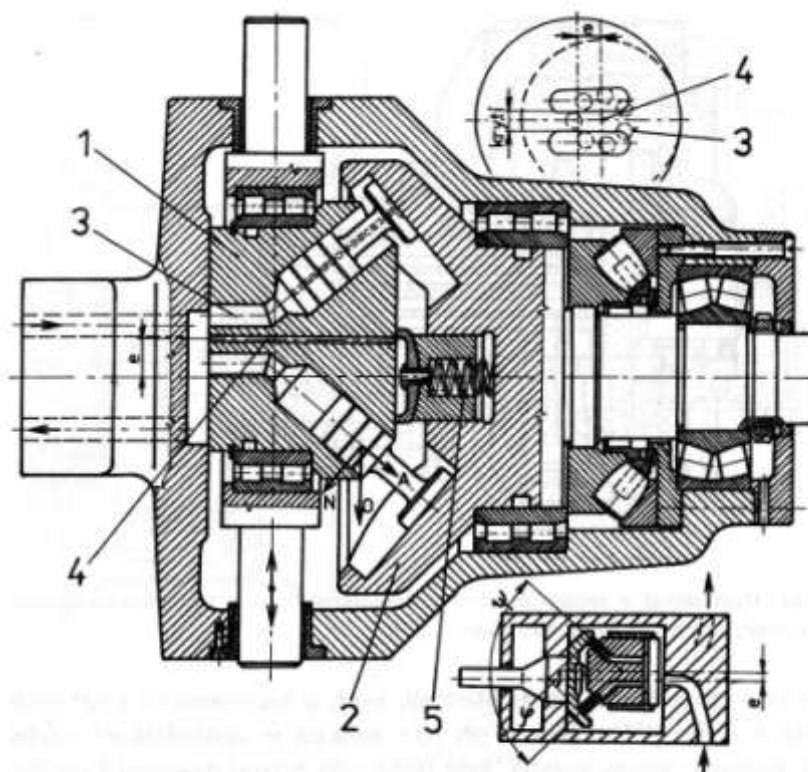


Obr. 2. 10 - Radiální pístové čerpadlo s nerotujícími písty [1]

Výhodou těchto strojů je rovnoměrné dopravování kapaliny, tichý chod a možnost plynulé změny průtoku. Tyto stroje musí být ovšem velmi přesně vyrobeny, což zdražuje jejich výrobu a jsou vhodné pro práci s čistými kapalinami.

1.2.7. Čerpadlo s diagonálními písty [1], [2]

Je to v podstatě přechod mezi stroji radiálními a axiálními. Jsou menší než radiální stroje a oproti axiálním snesou větší provozní tlaky. Ke zdvihu pístů dochází kvůli výstřednosti rotujícího bloku válců 1 vůči opěrnému talíři 2. Hydrostatická klouzátky pístů prokluzují po rovinných ploškách opěrného talíře. Na obrázku nahoře jsou dva výřezy v rozvodovém kotouči, do nichž je zavedeno přírodní potrubí a odpadní. Otvory 3, které krouží nad rozvodovými výřezy, postupně spojují činný prostor odpadního a přírodního potrubí. Opěrné pouzdro spojuje s krycí spárou rozvodu otvor 4. Klidné dosednutí bloku válců na rozvodovou plochu zajišťuje pružina 5. Posunutím bloku válců v příčném směru můžeme měnit výstřednost e bloku válců a opěrného talíře. Když máme výstřednost $e = \text{konst.}$, stroje se používají jako hydromotory, pokud se $e \neq \text{konst.}$ používají se jako čerpadla. Výkony se pohybují do 300 kW s otáčkami 1 500 min⁻¹.



Jednotka s rotujícími diagonálními písty a rovinně kmitajícím neodděleným rozvodem, fa Sauer, Neumünster, NSR

Obr. 2. 11 - Stroj s rotujícími diagonálními písty [1]

1.2.8. Pístová axiální čerpadla [1], [2]

Často používaná v dnešních hydraulických mechanismech, i jako motory. Oproti radiálním strojům mají vyšší otáčky, menší jednotkovou hmotnost a rozměry. Jsou ovšem hlučnější a mají kratší životnost.

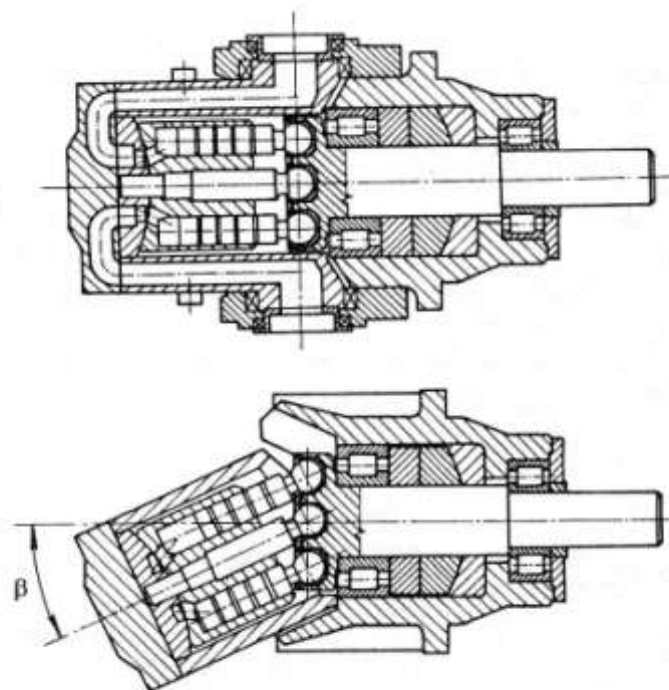
Dělí se na dvě varianty:

- S rotujícími písty a nerotujícím nakloněným tělesem
- S rotujícími písty a nerotující nakloněnou deskou

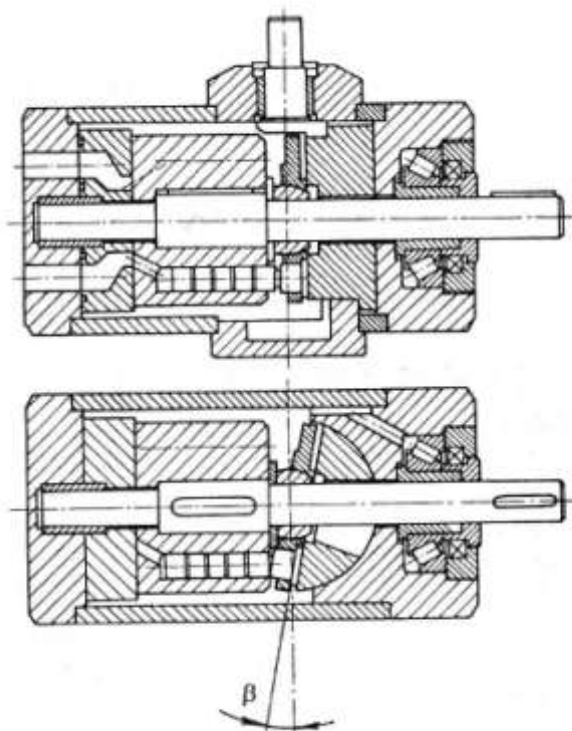
V první variantě, s nerotujícím nakloněným tělesem, je konec hřídele spojený s přírubou, v níž jsou uchyceny kulové čepy ojnic. Díky ojnic přenášejí přes vnitřní stěnu pístů synchronní pohyb hřídele na blok válců. Činný prostor pístů je čelně spojen s rozváděcí deskou. Pracovní kapalina se k rozváděcí desce přivádí v prstenci uloženém v otočně, šikmě naklápěcí, avšak nerotující desce. Čerpadla ale i hydromotory se vyrábí až do výkonů 5 MW, průtoků $5\,300\text{ dm}^3\text{min}^{-1}$, tlaků 40 MPa, geometrického 7 dm^3 a při otáčkách 800 min^{-1} .

Výhodou těchto strojů je jejich velký geometrický objem, kterého se dosáhne velkým úhlem mezi osou hřídele a naklápěcím tělesem, dochází k menšímu namáhání pístů, jsou méně citlivé na nečistoty v kapalině a mají lepší sací schopnost. Mezi nevýhody patří jejich velký rozměr a velká hmotnost. Je potřeba větší regulační práce a mají komplikovanější přívod a odvod kapaliny.

V druhé variantě, se blok válců otáčí společně s hřídelem. Ojnice má kulový kloub, který je v kluzáku opírající se o nakloněnou desku. Parametry stroje se mění změnou sklonu nakloněné desky, která se natáčí čepem vyvedeným z tělesa stroje. Fungují jako čerpadla ale také jako hydromotory do výkonů 400 kW, průtoků $430\text{ dm}^3\text{min}^{-1}$, tlaků 40 MPa, geometrického objemu 372 cm^3 a při otáčkách $1\,200\text{ min}^{-1}$. U obou variant je pracovní kapalinou olej.



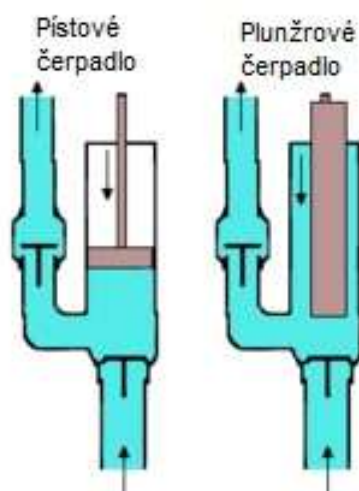
Obr. 2. 12 - Axiální stroj s rotujícími písty a nerotujícím nakloněným tělesem [1]



Obr. 2. 13 - Axiální stroj s rotujícími písty a nerotující nakloněnou deskou [1]

1.2.9. Plunžrové čerpadlo [1], [4], [5], [6], [7]

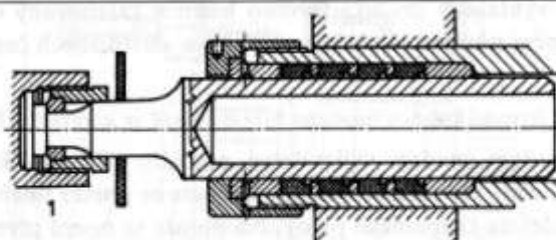
Jsou to v podstatě pístová jednočinná čerpadla ale píst a pístnice jsou nahrazeny jednou štíhlou dlouhou součástí o jednom průměru, tzv. plunžr. Materiál se volí, podle druhu čerpaného média. Je to výkovek z oceli s příměsí chromu (Cr), niklu (Ni) popřípadě molybdenu (Mo) nebo z bronzu. Povrch plunžru bývá chromovaný nebo nitridovaný, vyhlazený do zrcadlového lesku a lapovaný. Nejdůležitější rozdíl je ale v těsnění. U pístu je těsnění umístěno přímo na něm, pohybuje se tedy spolu s ním a na vstupu do válce. V případě plunžru je těsnění pouze na vstupu do válce. Těsnění plunžru je závislé na tlaku a vlastnostech čerpané kapaliny.



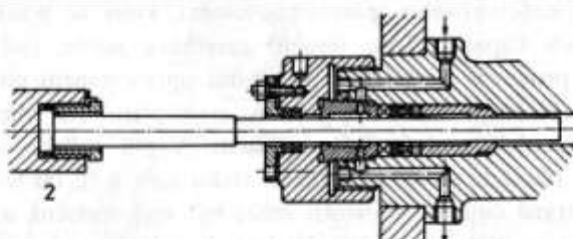
Obr. 2. 14 - Pístové a plunžrové čerpadlo [9]

Plunžrová čerpadla mohou být od ručních jednoválcových, schopných tlaku až 30 MPa, po devítiválcové vertikální s výkonem 3 MW. Plunžrová čerpadla se vyrábějí s počtem válců 1, 3, 4, 5, 6, 7 a 9. Horizontální s počtem válců 1, 3, 5 a 7. Navýšení počtu válců zvyšuje kapacitu čerpadla v případě, že rychlosti a zdvih zůstávají konstantní. Také zvýšení počtu válců má tendenci vyhladit průtokové odchylky, snižuje pulsační tlak (který je velkou nevýhodou) a odchylky točivého momentu na klikové hřídeli.

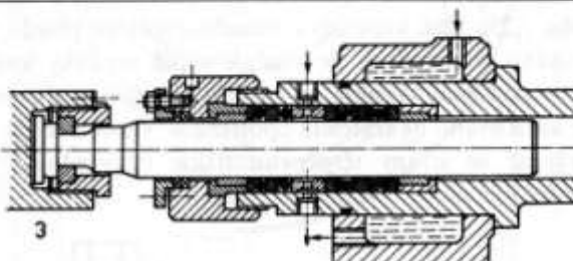
Tlumiče pulzací mohou být upevněny na sacím a výtlačném potrubí aby dále zmírnili velikost pulzací. Průtokové odchylky a tlakové pulsace nejsou jen závislé na počtu válců v čerpadle. Otáčky čerpadla a návrh potrubního systému mají významné účinky, které nemohou být ignorovány. Změny v potrubí mohou odstranit nejvýznamnější problémy.



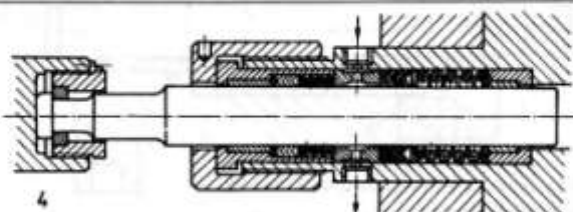
Rtovými manžetami s rozpěracími kroužky; vhodné pro neutrální oleje, mastné kyseliny a vodu do $\vartheta = 90^\circ\text{C}$, těsněný tlak do $p = 3\text{ MPa}$



Speciální manžetou s předfazenou měkkou ucpávkou, s chladicí a proplachovací komorou; použití pro čerpání petroleje do $p = 100\text{ MPa}$



Kovovými kroužky; mezi vnitřní a vnější částí ucpávky je kapalinový uzávěr, předfazená měkká ucpávka, pouzdro ucpávky chlazené; použití pro čerpání triethylenu a kerosinu do $p = 14\text{ MPa}$



Dvoustupňové těsnění manžety V předepjatou pružinou; mezi oběma stupni je hydraulický uzávěr; použití pro čerpání těžké radioaktivní vody $\vartheta = 50^\circ\text{C}$, do $p = 10\text{ MPa}$

Obr. 2. 15 - Příklady těsnění plunžru [1]

Mezi jejich nejčastější poruchy patří:

- Vysoké opotřebení ložisek
- Porucha klikové hřídele
- Velmi krátká životnost těsnění
- Lom na šroubu/čepu
- Selhání sacího ventilu, rychlé opotřebení sedla
- Trhliny ve válci

Plunžrová čerpadla jsou schopná pracovat s velmi vysokými tlaky a mohou čerpat znečištěnou a agresivní kapalinu i médium s abrazivními látkami. Běžné jsou tlaky do 50 MPa. Vypouštěcí tlaky kolem 100 MPa jsou běžné při odstraňování vodního kamene a vysokotlakém vodním tryskání (vodní paprsek). Čerpadla mohou dosahovat tlaků až 350 MPa. Průtoku $500 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ se dosáhne do tlaku 10 MPa.

Kromě toho jsou plunžrová čerpadla použita pro nízké tlaky, náročné aplikace, kde jsou dobré sací schopnosti vyžadovány a nízké otáčky nezbytné pro snížení opotřebení. Zbytky ze dna nádrží, usazeniny, průmyslové a komunální odpady a kanalizační splašky jsou typické směsi zpracovávané původním provedením vertikálních čerpadel. Plunžrová čerpadla mají velmi široké využití v praxi.

Využití plunžrových čerpadel:

- Čerpadla pro napájení kotlů
- Chemické zpracování
- Obnovení surové ropy/vodní emulze
- Olejo-vodní emulze hydrauliky
- Domácí vysokotlaké čističe
- Garážové mycí linky
- Čerpání plynů
- Vysokotlaký vodní paprsek
- Čistění nádrží
- Aut, kolejí a letadel
- Potrubí a trubek
- Čistění kanalizací
- Vstřikování, napájení a dávkování
- Řezání, odebírání a bourání
- Odstraňování barvy a rzi
- Lisování plastů
- a další, které byly například popsány u pístových čerpadel



Obr. 2. 16 - Příprava povrchu - 260 MPa [7]

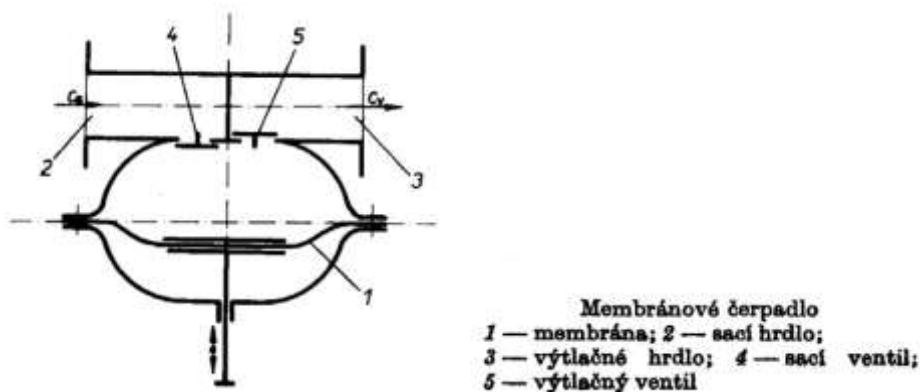


Obr. 2. 17 - Řezání betonu - 280 MPa [7]

1.2.10. Membránová čerpadla [1], [2]

Tlak oleje, který je vyvozený pístovým čerpadlem a působí na membránu z opačné strany než ze které je kapalina dopravována, nejčastěji zprostředkovává pohyb pružné membrány. Tato čerpadla se vyrábějí převážně z nerezové oceli a pro zvýšení vnitřní těsnosti jsou vybaveny dvěma až třemi sacími a výtlačnými kulovými ventily s velkou průchodností a otěruvzdorností. Nepřetržité technologické procesy chemického, potravinářského a farmaceutického průmyslu často vyžadují dávkování velkého množství tekutých složek. Z těchto důvodů se některé agregáty sestavují s paralelně řazenými dávkovacími čerpadly. U dávkovacích membránových čerpadel, která se používají v chemickém průmyslu, působí na membránu tlakové pulsace oleje vyvolané programově řízeným pohybem pístu, ten je řízen vačkou. Otáčení této vačky je programově řízeno krokovým elektromotorem. Aby stlačitelnost média neovlivňovala přesnost dávkování, zahrnuje program otáčení vačky korekci její úhlové rychlosti na tlak a na obsah plynu v pracovním médiu.

Hermetické provedení čerpadla je nezbytné, jestliže průsaky kapaliny z pracovního média jsou ekologicky závadné. Pro minimalizaci pulzací průtoku může být čerpadlo provedeno jako tříválcové a vybaveno pneumatickými tlumiči rázů. Případná porucha membrány musí být indikována. Z důvodů náhlého protržení se používá dvojité membrána, aby nemusela být olejová náplň pístového pulsátoru vyměňována nebo aby nedošlo k poškození pulsátoru. Mechanické membránové čerpadlo je obvykle nízkotlaké čerpadlo, které snáší vysoké teploty. Jako nízkotlaké vratné čerpadlo má několik užitečných výhod oproti pístovému a plunžrovému čerpadlu. Čerpadla jsou suchá samonasávací, a když jsou ventily udržovány v dobrém stavu, sací schopnost dosáhne až výšky 6 m. Nepřetržitý chod nasucho je možný. Používá se k dopravě tuhých odpadů (popílek, struska), velmi hustých suspenzí (malta, beton) a v odsiřovacích zařízeních tepelných elektráren.



Obr. 2. 18 - Membránové čerpadlo [10]

1.2.11. Peristaltické (Hadicové) čerpadla [2], [4]

Peristaltické čerpadla jsou bezventilovou variantou membránový čerpadel. Dopravují kapalinu mechanicky stlačováním prostoru v uzavřeném a pružném elementu. Nejvíce obvyklé peristaltické čerpadlo, je hadicové čerpadlo. Pracuje tak, že válci nebo vačkami působí přímo na hadici obsahující kapalinu. Počet válečků nebo vaček se liší v závislosti na výrobci, průmyslová čerpadla mají 2 nebo 3, ale malé laboratorní čerpadla mohou mít až sedm. Čerpadlo může být vybaveno jednou nebo více hadicemi, někdy i třiceti. Svého času bylo použití peristaltického čerpadla omezeno převážně na laboratorní a podobné specializované aplikace, ale vývoj v technologii kaučuku mají za následek nové generace těžkých nákladních čerpadel a peristaltické jednotky se nyní nachází v celé řadě průmyslových funkcí zahrnující viskózní kapaliny a abrazivní kaly, jakož i produkty s vysokým obsahem pevných látek. Důležitým faktorem ve prospěch peristaltické koncepce čerpadla je schopnost pracovat s pevnými látkami až na maximální velikost otvoru hadice. U většiny návrhů čerpadel je omezená velikost pevných látek do přibližně 15% z velikosti čerpací větve.

V jednom moderním robustním provedení pohyb válce a svírání hadice se odehrává v uzavřeném pouzdře částečně naplněném směsí glycerinu a glykolu. To nejen maže vačky, ale také funguje jako chladiivo a mazivo na vnější straně hadice čerpadla. Toto hadici prodlužuje životnost a snižuje výskyt mechanické poruchy. Životnost přes 3000 hodin je zcela běžná. Peristaltické čerpadlo je možné použít pro všechny druhy kapalin a do jisté míry i plyny. Sací výkon se velmi liší pro různé stavby. Výtlačné tlaky jsou obvykle pod 1 MPa, ale čerpadla byla použita do 4 MPa, ovšem životnost hadice je velmi krátká. Velká čerpadla, s průměry 125 mm, jsou dimenzována na 0,25 MPa. Kapacity se liší od velmi malých množství $0,001 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$ až po průtoky $50 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Speciální čerpadla jsou k dispozici pro průtoky více než $3000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.



Obr. 2. 19 - Hadicové čerpadlo [5]

1.3. Hydrodynamická čerpadla

1.3.1. Obecný popis [1], [2], [3]

Základním pracovním prvkem hydrodynamických čerpadel jsou lopatky oběžného kola, které jsou k ose otáčení situovány radiálně, diagonálně nebo axiálně. Podle umístění vůči ose se rozlišují na základní typy čerpadel. Jejich konstrukční tvary jsou rozdílné podle způsobu využití. Na Obr. 2. 20 jsou uvedeny charakteristické vlastnosti hydrodynamických čerpadel.

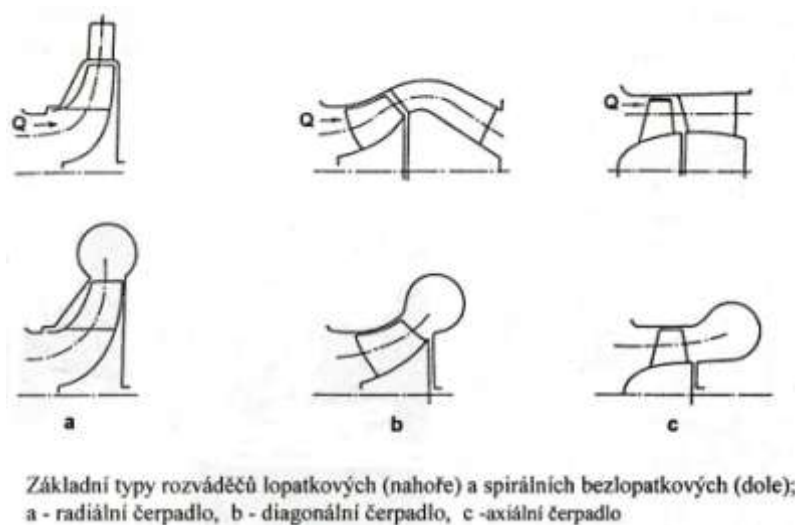
Měrné otáčky n_q (min^{-1})	Typ oběžného kola	Meridiánový řez oběžným kolem	Výstupní a vstupní rychlostní trojúhelníky	Charakteristiky čerpadla
10 až 30	radiální	$D_2/D_1 = 3,5$ až 2 		
22 až 60	radiální se zborcenými lopatkami	$D_2/D_1 = 2$ až 1,5 		
50 až 70	Francisovo	$D_2/D_1 = 1,5$ až 1,3 		
70 až 120	diagonální	$D_2/D_1 = 1,2$ až 1,1 		
60 až 135	diagonální vrtačové	$D_2/D_1 = 1,25$ až 1,9 $\phi = 70^\circ$ až 120° 		
110 až 410	axiální vrtačové	$D_2/D_1 = 1,6$ až 2,4 		

Obr. 2. 20 - Charakteristické znaky základních typů hydrodynamických čerpadel [1]

Z hydraulického hlediska je nejvýhodnější dělit čerpadla podle měrných otáček, které dále charakterizují tvar kanálu oběžného kola. Výchozími hodnotami při volbě hydrodynamického čerpadla jsou jeho hlavní parametry průtok Q a měrná energie Y . Dále se musí zohlednit vlastnosti dopravované kapaliny. Tedy hustota, která má vliv na příkon čerpadla, dynamická viskozita, která má vliv na účinnost čerpadla a také tlak nasycených par p_w při provozní teplotě, který má vliv na kavitaci. Skladba parametrů Q a Y je podstatná pro volbu potřebného oběžného kola, která jsou charakterizována měrnými otáčkami.

$$n_q = 333 \cdot n \cdot \frac{Q^{0,5}}{Y^{0,75}} \quad [\text{min}^{-1}] \quad [1] \quad (1.1)$$

U těchto čerpadel slouží výstupní část k převedení kapaliny z výstupu oběžného kola na výtlačné hrdlo, přitom se ve výtakovém kanálu mění část kinetické energie kapaliny na tlakovou. Za oběžným kolem je výtakovým průřez, který se dělí na větší počet krátkých kanálů (lopatkový rozváděč) anebo na jeden či více dlouhých kanálů (bezlopatkový rozváděč - spirála). U jednostupňových čerpadel se převážně volí spirální obrys výtakového kanálu a u vícešupňových čerpadel to je výtakový kanál ve tvaru lopatkového rozváděče. Občas se tyto dva způsoby kombinují dohromady. Provedení se spirálou ovšem dává menší účinnost než lopatkové rozváděče. Tento rozdíl se avšak zmenšuje natolik, u čerpadel s rostoucí rychloběžností, že axiální čerpadlo s lopatkovým rozváděčem je téměř rovnocenné provedení se spirálou.



Obr. 2. 21 - Základní typy rozváděčů [2]

1.3.2. Typické konstrukce hydrodynamických čerpadel [2]

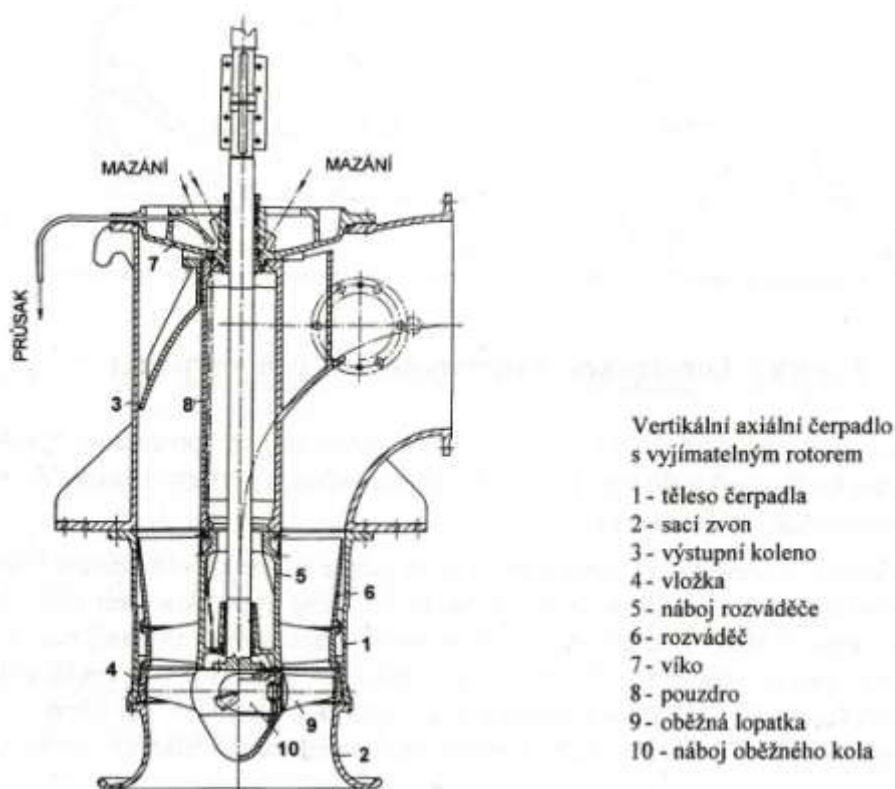
Vysoké požadavky na čerpací techniku jsou důvodem prodeje velkého množství konstrukčních variant základních typů čerpadel.

1.3.2.1. Míchací čerpadla [2]

Ve většině případech jsou to čerpadla axiálního typu, která jsou konstruována jako propelery nebo vrtule s krycím límcem a jsou umístěny v míchací nádrži ve které se mohou horizontálně naklápět a vertikálně posouvat. Vyznačují se hlavně nízkou měrnou energií obsaženou v kinetické energii kapaliny. Využívají se hlavně u chovu ryb, čeření kalů a udržování volné vodní hladiny za mrazů. Dále se občas užívají v chemickém a potravinářském průmyslu při míchání vícesložkových kapalin, které je kombinováno s provzdušněním kapaliny.

1.3.2.2. Axiální čerpadla [2]

Využívají se převážně v čistírnách odpadních vod, v zemědělství pro nízkotlaké zavlažování nebo v tepelných elektrárnách jako čerpadlo pro chlazení vody. Při požadavku rychlé revize nebo opravy exponovaných součástí čerpadla se vyrábějí s vyjímatelným rotorem nebo v monoblokovém provedení s elektromotorem jako ponorný čerpací agregát.

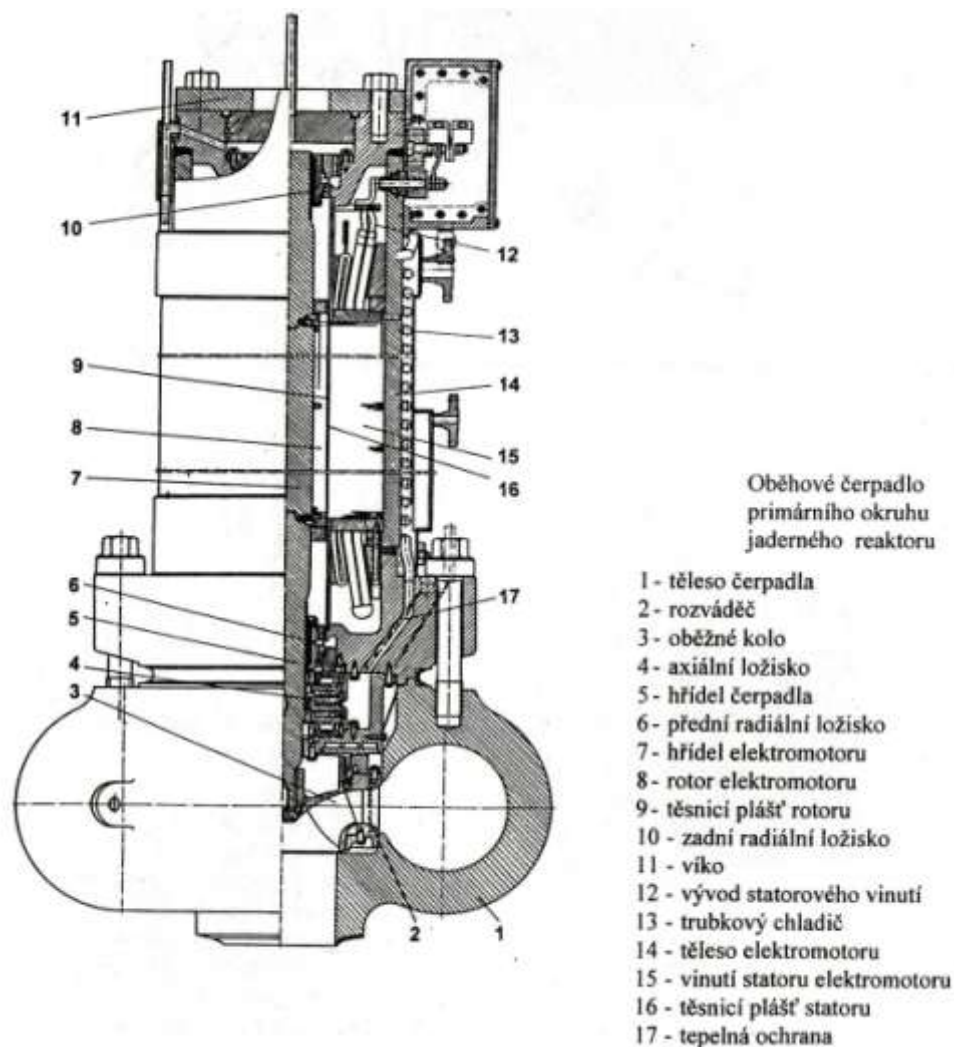


Obr. 2. 22 - Vertikální axiální čerpadlo s vyjímatelným rotorem [2]

1.3.2.3. Oběhové čerpadlo [2]

Většinou se vyrábějí radiálního typu a užívají se pro cirkulaci kapaliny v uzavřeném potrubním oběhu. Užívají se oběhové čerpadla horkovodních topných soustav, která jsou v hermetickém monobloku s elektrickým motorem. V monobloku bývají i elektronické prvky pro řízení provozu čerpadla. Hermetickým uzavřením se na straně pohonu kolem hřídele vylučují průsaky kapaliny.

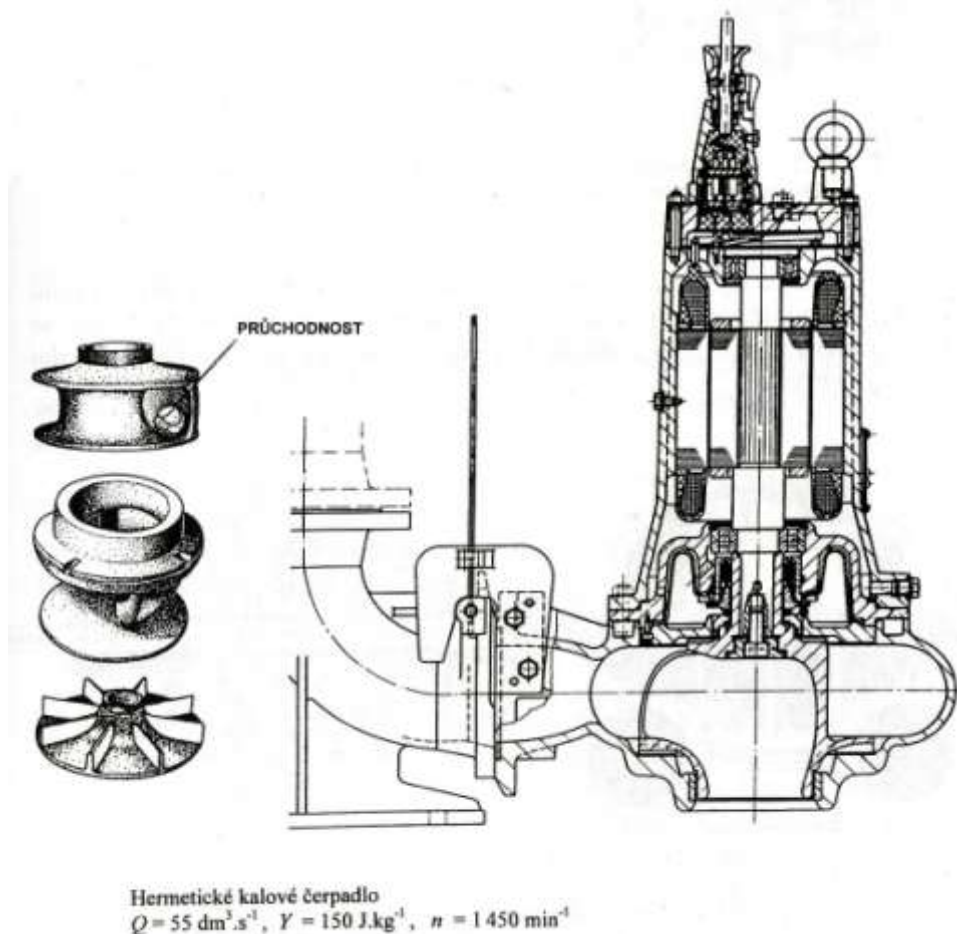
U tepelné energetiky bývají oběhová čerpadla teplotně odolná kapaliny přibližně do výkonů 1 MW, také v hermetickém provedení. Na *Obr. 2. 23* je oběhové čerpadlo primárního okruhu lodního jaderného reaktoru.



Obr. 2. 23 - Oběhové čerpadlo primárního okruhu lodního jaderného reaktoru [2]

1.3.2.4. Kalová čerpadla [2]

Užívají se k čerpání znečištěné vody i vody s abrazivními příměsemi a tekutých hnojiv. Na *Obr. 2. 24* je vyobrazeno kalové čerpadlo v hermetickém provedení s elektrickým motorem. Na velikosti pevných součástí kalů záleží průchodnost kanálů oběžného kola čerpadla. Hermetické provedení umožňuje ponoření kalového čerpadla na dno sací jímky. Vyrábí se i mobilní kalové čerpací agregáty určené na vyčerpávání zatopených sklepů budov a stavebních jímek.



Obr. 2. 24 - Hermetické kalové čerpadlo [2]

1.4. Speciální čerpadla [2], [3]

Čerpadla speciální jsou rozdílné od běžných čerpadel doplňující a často jedinečnou funkcí. Rozdělují se na čerpadla proudová, které k čerpání využívají energie další kapaliny nebo plynu a patří k nim vodní ejektory, vodní trkače a mamutová čerpadla. Tato čerpadla nejužívanější. Druhou skupinou jsou čerpadla vývěvních účinků.

1.4.1. Vodní ejektory [2], [3]

Jejich princip funguje na snižování tlaku v místě zúžení proudu pracovní kapaliny. Snižování tlaku způsobuje nasávání dopravované kapaliny a její tlak se následně za zúženým místem zvýší na požadovanou hodnotu při plynulém rozšiřování průtokového průřezu. Ejekčním účinkem pracovní kapaliny o určitém průtoku Q_p , zrychleném v trysce 1, se do směšovací komory 2 nasaje kapalina o průtoku Q a tlaku p_s v sacím hrdle S. Paprsek pracovní kapaliny, který vystupuje z trysky, sebou strhává čerpanou kapalinu do válcového nástavce 3 a poté kapalina o souhrnném průtoku $Q + Q_p$ a tlaku p proudí difuzorem 4 do výstupního hrdla V.

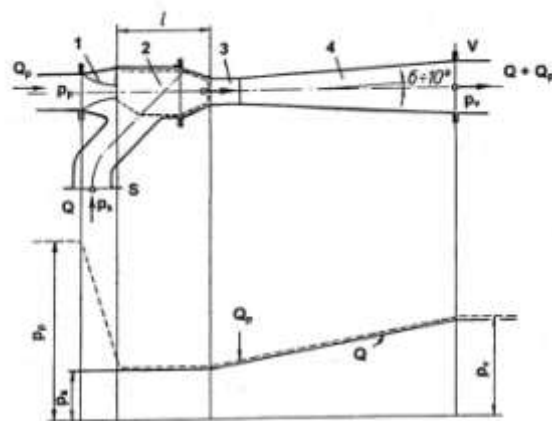


Schéma a tlakové poměry vodního ejektoru; S - sací hrdlo, V - výtláčné hrdlo
1 - tryska, 2 - směšovací komora, 3 - válcový nástavec, 4 - difúzor
 Q_p - průtok pracovní kapaliny, Q - průtok čerpané kapaliny

Obr. 2. 25 - Schéma a tlakové poměry vodního ejektoru [2]

Využívají se tam, kde není určující účinnost (občasné čerpání žumpy nebo mísení studené a horké vody v teplovodních sítích). V čerpací technice se ejektory nejčastěji uplatňují jako podávací jednotka vývěv nebo samonasávacích čerpadel.

1.4.2. Vodní trkače [2]

Užívají k čerpání vodního rázu, který vzniká náhlým zastavením průtoku. Voda odtéká přívodním potrubím k trkači ze spodní nádrže a jeho ventilem 1 do odpadu. Za určité výtokové rychlosti se dynamickým účinkem vody ventil uzavře. Tím dojde v přívodní oblasti trkače k hydraulickému rázu doprovázeného stoupnutím tlaku vody. Tento zvýšený tlak otevře ventil 2 a voda z nádrže začne vyplňovat větrník do doby, než nestacionární zvýšení tlaku pomine. Potom se ventil 2 uzavře působením tlaku větrníku a ventil 1 se pomocí pružiny nebo závaží otevře. Děj se opakuje, až tlak ve vzduchu ve větrníku stoupne na takovou hodnotu, která vytlačí vodu stoupajícím potrubím do horní nádrže.

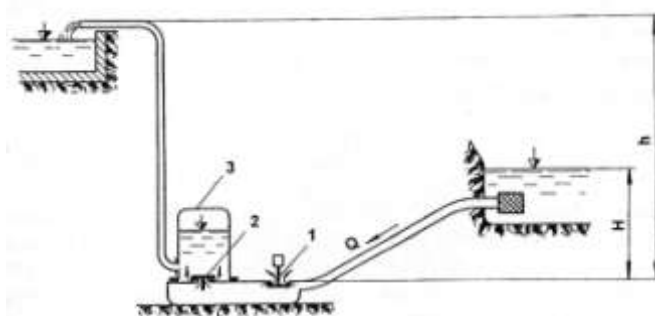


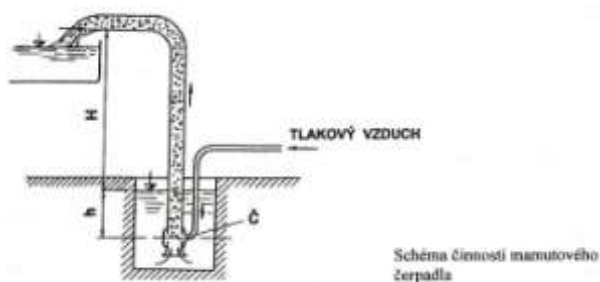
Schéma čerpacího systému s vodním trkačem
1 - odpadní ventil, 2 - ventil větrníku, 3 - větrník

Obr. 2. 26 - Schéma čerpacího systému s vodním trkačem [2]

Jejich provoz je levný a pracují spolehlivě i bez obsluhy (s výjimkou možnosti zamrznutí). Užívají se tam, kde není k dispozici elektrický pohon je nadbytek vody se spádem $H > 1$ m. Maximální výtlačná výška je $h = 25 \cdot H$.

1.4.3. Mamutová čerpadla [2], [3]

Tato čerpadla pracují s rozdílem měrných hmotností vody a směsi vody se vzduchem. Ve svislém potrubí, ponořeného dolního konce v jímce vody je přívod stlačeného vzduchu. A protože hustota vody je vyšší než hustota směsi vody a vzduchu, dojde v potrubí k tzv. komínovému účinku.



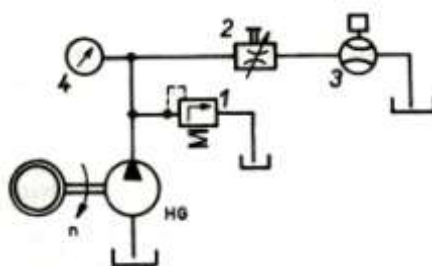
Obr. 2. 27 - Mamutové čerpadlo [2]

Jejich účinnost se pohybuje kolem 25 % až 40 %, která se snižuje příkonem kompresoru vzduchu, předbíháním bublinek vzduchu vůči vzestupnému proudění vody a expanzí vzduchu při ubývání tlaku vody při jejím proudění vzhůru. Jednou z jejich výhod je, že pracují bez jakýchkoliv pohyblivých mechanismů. Dále nejsou citlivá na nečistoty i větší pevné příměsi.

2. Způsoby měření a vyhodnocení parametrů čerpadel

2.1. Základní parametry čerpadla [3]

Charakteristickou a nejpodstatnější vlastností každého čerpadla je průtok Q [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$], dále otáčky n [s^{-1}], měrná energie Y [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$], dopravní výška H [m], výkon P_V [W], příkon P_P [W], účinnost η a kavitační vlastnosti.



Obr. 3. 1 - Schéma obvodu pro měření charakteristiky čerpadla [1]

2.2. Zkoušení čerpadla [3]

K ověření parametrů čerpadla se užívá různých zkoušek:

- **Typová zkouška** – ověření prototypu čerpadla výrobcem
- **Kontrolní zkouška** – po ukončení montáže výrobce kontroluje technické a výkonné parametry
- **Přejímací zkouška** – výrobce dodatečně ověří funkci čerpadla za provozních podmínek

Přesněji jsou popsány v normách ČSN 110037, ČSN 110033.

2.2.1. Měření průtoku [3], [12]

Objemový průtok Q je definován objemem kapaliny, která projde potrubím za danou jednotku času [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]. Pro určení objemového průtoku se užívá měření pomocí rozdílů tlaků anebo výpočet ze známé rychlosti proudění tekutiny v potrubí o známém průřezu. Hmotnostní průtok Q_m je definován jako hmotnost kapaliny, která proteče potrubím za danou jednotku času. Lze ji nepřímo určit ze vzorce $Q_m = Q \cdot \rho$ [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]. Předpokládáme ovšem, že tekutina zaplňuje celé potrubí, což nemusí vždy odpovídat skutečnosti. Při měření průtoku kapalin je někdy potřeba provádět korekci objemového průtoku na změny teploty a tlaku. Průtok se měří při konstantních otáčkách a výkon se nesmí měnit. Kapalina, která protéká mezi čerpadlem a místem měření se nesmí unikat ani se přidávat. Dovolená odchylka pro dopravované množství kapaliny při jednom měření je $\pm 2\%$. Pokud je odchylka větší musí se přezkoumat, zda chyba při měření množství má být zvětšena nebo měření nulovat.

Měření se provádí těmito způsoby:

- Vážením
- Odměrnou nádrží
- Normalizovanou dýzou nebo Venturiho trubicí
- Clonou
- Snímačem průtoku

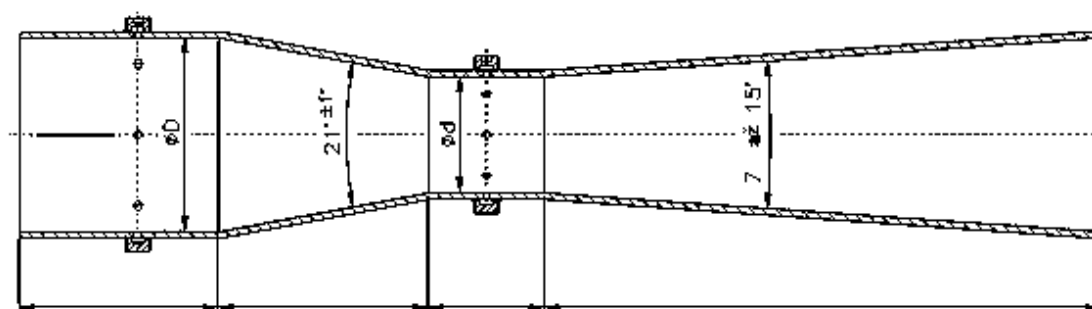
2.2.1.1. Clona [12]

Clona je plochá kovová deska s kruhovým otvorem, která se nachází v potrubí mezi přírubami. Umístění otvoru clony a velikost jeho škrťacího průměru závisí na typu měřené tekutiny. Před a za deskou se provádějí odběry statických tlaků. Existují dva základní typy odběrů - koutové odběry a přírubové odběry.

Základními typy clon je clona soustředná (normalizovaná), segmentová a excentrická. Průtokoměry se škrťací clonou jsou robustní a i při velkých průměrech potrubí jsou relativně levné. Clonou lze měřit průtok většiny čistých tekutin. Jsou však náchylné vůči opotřebení, které může být způsobeno znečištěným médiem nebo médiem s částicemi. To může ovlivnit tlakovou diferenci odpovídající určitému průtoku. Aby se dosáhlo požadovaných vlastností, musí být clona zabudována do přímého úseku potrubí s předem definovanými uklidňujícími úseky před a za clonou (uklidňující potrubí před a za průtokoměrem je udáváno u všech typů průtokoměrů, ovšem u normalizované clony bývají tyto úseky jedny z nejdelších).

2.2.1.2. Venturiho trubice [12]

U Venturiho trubice je tekutina zrychlena v kuželovém konfuзору, což opět vyvolá místní pokles statického tlaku. V následující části trubice, difuzoru, se tlak téměř vrací na úroveň tlaku před zúžením. Výhodou Venturiho trubice je menší tlaková ztráta než u clony a velká přesnost měření. Nevýhodou je poměrně vysoká cena, proto se Venturiho trubice využívá velmi málo.

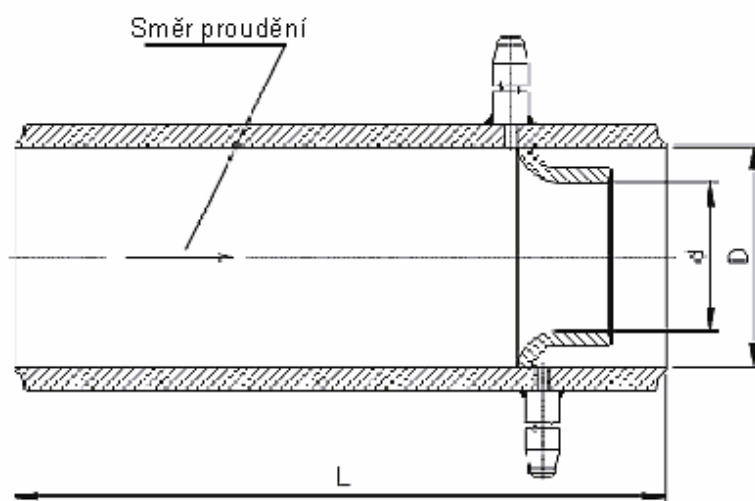


Obr. 3. 2 - Venturiho trubice [12]

2.2.1.3. Dýza [12]

Dýza je vlastně kompromis mezi clonou a Venturiho trubicí. Dýza na rozdíl od Venturiho trubice neobsahuje difuzor. Dýzy umožňují měřit větší průtok než clony a také umožňují měřit průtok u tekutin, které obsahují větší pevné částice. Navíc jsou dýzy

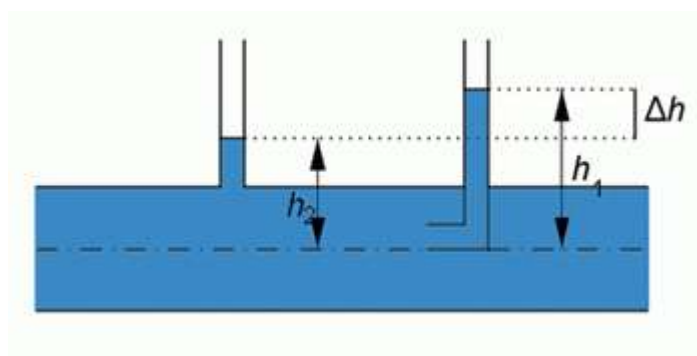
levnější než Venturiho trubice, ale na druhou stranu jsou méně přesné a způsobují větší tlakovou ztrátu.



Obr. 3. 3 – Dýza [12]

2.2.1.4. Pitotova trubice [12]

Pitotova trubice patří k nejstarším a nejjednodušším rychlostním sondám pro měření průtoku tekutiny. Primárním prvkem Pitotovy trubice je tenká trubička otočená ústím proti směru proudění tekutiny. Pitotovy trubice se používají především pro měření průtoku plynů nebo velmi čistých kapalin z důvodu možného zanesení otvorů trubice, kterými se tlak snímá. Na výstupu Pitotovy trubice je velmi malý rozdíl tlaků, který už ale v současné době není tak problematické změřit. Navíc přesnost měření závisí na rychlostním profilu proudění. Z principu Pitotovy trubice byly odvozeny další typy sond, například víceotvorová rychlostní sonda (známá také pod obchodním Annubar).



Obr. 3. 4 - Pitotova trubice [12]

2.2.1.5. Plováčkové průtokoměry [12]

Základem plováčkového průtokoměru je svislá kónická měřicí trubice, která se rozšiřuje směrem nahoru. V ní se volně pohybuje plováček z materiálu s hustotou větší než

je hustota měřené tekutiny. Pokud tekutina neproudí, je plováček v trubici dole. Jakmile začne tekutina proudit, začne se plováček zvedat. Při určitém průtoku zaujme plováček rovnovážnou polohu s takovou plochou mezikruží, při níž je síla nadnášející plováček právě rovna gravitační síle, kterou na něj působí zemská přitažlivost. Zdvih plováčku je úměrný rychlosti proudění.

Tvary plováčků se řídí účelem použití. Poloha plováčku se zjišťuje buď přímo na stupnici na stěně skleněné trubice průtokoměru, nebo se snímá elektricky (je samozřejmě možné i pneumatické snímání pomocí systému klapka - tryska). K nejvýznamnějším výhodám těchto průtokoměrů patří jejich měřicí rozsah (10:1), malá tlaková ztráta, snadná instalace, relativně nízká cena a schopnost měřit i malé průtoky.

2.2.1.6. Turbínkové průtokoměry [12]

Jejich základem je volně otočný rotor s lopatkami. Rotor se vlivem proudění tekutiny otáčí, kdy otáčky jsou úměrné rychlosti proudění tekutiny. Otáčky bývají snímány bezdotykovým indukčním snímačem, kdy výstupem jsou napěťové impulsy, které se dále zpracovávají a vyhodnocují.

Výhodou těchto průtokoměrů je jejich široký rozsah při měření rychlostí, opakovatelnost měření i krátkodobá přesnost. Většinou se používají pro měření průtoku vody. Nevýhodou je, že je nelze použít u tekutin, které při proudění v potrubí víří, a nejsou doporučovány ani pro tekutiny s velkou viskozitou. Protože turbínkové průtokoměry obsahují pohyblivé části, jsou náchylné na opotřebování a na usazování nečistot.

2.2.2. Měření dopravní výšky [3]

Pro měření dopravní výšky je potřeba dvou cejkovaných tlakoměrů s dvojím na sobě nezávislým ukazovacím zařízením nebo kapalinový tlakoměr. Dopravní výška čerpadla H je rozdíl celkové energie dopravované kapaliny. Ten se získá kapalina při průchodu čerpadlem a určí se ze vztahu

$$H = \frac{p_v - p_s}{\rho \cdot g} + \Delta z + \frac{v_v^2 - v_s^2}{2 \cdot g} \quad (2.1)$$

kde p_v [Pa] je přetlak ve výtlačném hrdle čtený na manometru

p_s [Pa] je tlak v sacím hrdle čtený na manometru či vakuometru

$\Delta z = (z_2 - z_1)$ [m] je rozdíl výšek mezi místem měření tlaku p_v, p_s .

Rozdíl je kladný, je-li odběr ve výtlačku výše jak odběr v sání.

ρ [kg·m⁻³] je měrná hmotnost čerpané kapaliny při dané teplotě.

v_v, v_s [m·s⁻¹] jsou rychlosti kapaliny v místech měření p_v a p_s ,

Na vstupním a výstupním hrdle se měří tlaky p_v a p_s . Měření tlaků se nesmí provádět v místech změny průřezu nebo směru proudění. Až v určité vzdálenosti od čerpadla dochází k úplné přeměně energie, proto je lepší zvolit místo odběru tlaku za výtláčným hrdlem tam, kde je největší součet $\frac{p_v}{\rho \cdot g} + \Delta z + \frac{c_v^2}{2 \cdot g}$ (2.2), stanoví se zkouškou. Pokud se měří ve výtláčném nebo v sacím potrubí tlaky p_v a p_s , k naměřené dopravní výšce se musí připočítat odpor uzávěrek a částí potrubí mezi místem a čerpadlem.

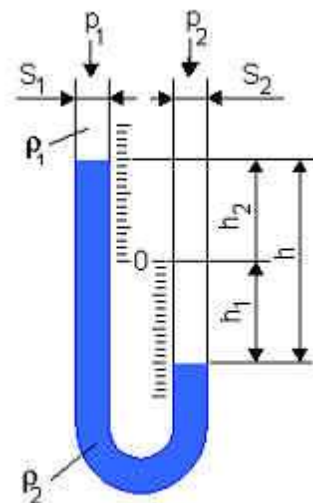
2.2.3. Měření tlaků [13]

Pro měření absolutního tlaku od absolutní nuly až po atmosférický tlak se v technické praxi používají převážně hydrostatické přístroje s vodním nebo rtuťovým kapalinovým sloupcem. Princip je založený na účinku hydrostatického tlaku, který je převáděn na délkovou stupnici, výsledná hodnota závisí na hustotě měřicí kapaliny. Tyto přístroje jsou velmi přesné. Mezi tyto měřidla patří například U-trubice, je to skleněná nádoba ve tvaru U naplněná manometrickou kapalinou (voda, rtuť, alkohol, tetrachlor), nádobkový tlakoměr, což je modifikace U-tlakoměru, plovákový tlakoměr a mikromanometr. Pokud mají stupnici vynesenu od absolutní tlakové nuly, nazývají se vakuometry, pro přetlaky se používají manometry. Pro měření menších tlaků se používají přístroje deformační nebo se kapalinovým sloupcem a větších tlaků se měří s deformačními nebo pístovými přístroji. U deformačních přístrojů způsobuje měřený tlak pružnou deformaci a dle Hookova zákona je její velikost úměrná hodnotě měřeného tlaku. Nejpoužívanějšími tlakoměry je Bourdanova trubice, membrána a vlnovec, nejčastěji používané v průmyslu. U skupiny tlakoměrů se silovým účinkem se měření tlaku převádí na měření síly, jejíž účinek je vyvažován pružinou nebo závažím. Patří zde pístové a zvonové tlakoměry a využívají se nejčastěji ke kalibraci. Elektrické tlakoměry se využívají pro dynamické změny tlaku a řadí se mezi ně snímače tlaku s odporovými tenzometry nebo piezoelektrické snímače tlaku.

2.2.3.1. U-trubice [13]

využívá se při vyšších tlakových diferencích a je to nejjednodušší forma tlakoměru. Z poloviny je naplněna měřicí kapalinou. Oba konce jsou otevřeny do ovzduší a hladina v obou ramenech je ve stejné výšce. Pokud je k levému rameni přiveden vyšší tlak (přetlak) měřicí kapalina se stlačí dolů a v pravém rameni vystoupá nahoru. Rozdíl h

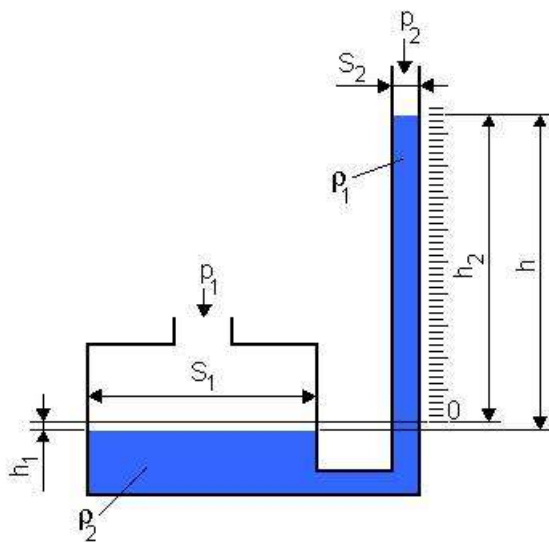
určuje tlakovou diferenci. Pokud je v levém rameni podtlak, kapalina vystoupá nahoru a v pravém rameni klesne pod nulu.



Obr. 3. 5 - U-trubice [13]

2.2.3.2. Nádobkový tlakoměr [13]

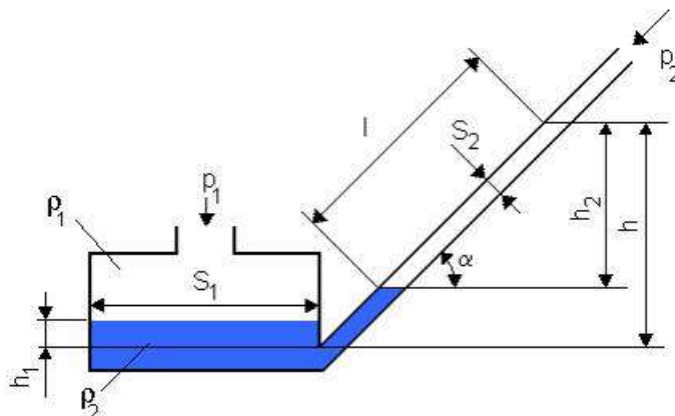
Je založen na stejném principu jako U-trubice, ale jedno jeho rameno je tvořeno větší nádobkou. Změna hladiny tedy v nádobce bude téměř neznamatelná oproti pravému rameni.



Obr. 3. 6 - Nádobkový tlakoměr [13]

2.2.3.3. Tlakoměr se sklopnou trubicí [13]

Jsou podobné nádobkovým tlakoměrům. Tlakoměry se sklopnou trubicí jsou konstruovány pro přesnější odečítání hodnot. Jejich stupnice nemusí být rovnoměrná a může být naklápěna pod různými úhly při různých měřeních. Potom je potřeba přepočítat hodnotu h v poměru, který je uvedený na tlakoměru.



Obr. 3. 7 - Tlakoměr se sklopnou trubicí [13]

2.2.3.4. Bourdanova trubice [13]

U deformačních tlakoměrů působí elastické členy v mezích pružné deformace a ta je způsobena měřeným tlakem a namáhaný člen se po odlehčení vrátí do původního stavu. Nejběžnějším elastickým členem je Bourdanova trubice, jejíž teorie a byla nejlépe propracována. Má eliptický průřez se střednicí tvaru kruhového oblouku. Někdy bývá stočená do spirály nebo šroubovice. Jeden konec je uchycen v tlakové přípojce, zatím co druhý je volný. Při zatížení trubice tlakem se vlivem deformace se trubice napřimuje a volný konec se odchyluje. Tato výchylka se přes převodový mechanismus přenáší na ručičku stupnice a ta ukazuje velikost tlaku. Bourdanova trubice je nejpoužívanější z deformačních tlakoměrů a je jí možno používat pro měření jak přetlaku, tak podtlaku v rozsahu od 0,5 MPa až do 2 000 MPa.

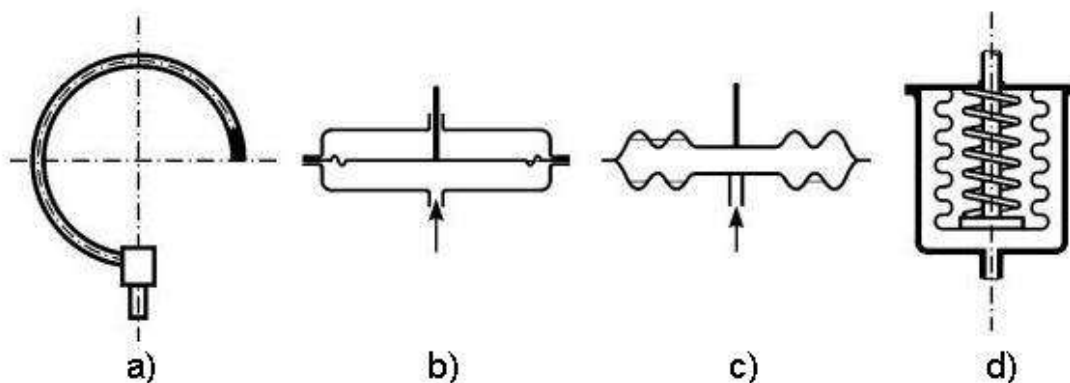
2.2.3.5. Membrána [13]

Druhým často používaným elastickým členem je membrána, která je většinou kruhového tvaru, v obvodě upnutá a zatížená měřeným tlakem z jedné strany. Vyrábí se i membrány zvlněné nebo prohnuté, pokud je třeba snížit jejich tuhost a zároveň zachovat jejich pevnosti. Používají se pro měření přetlaku, podtlaku a diferencí tlaku. Mají rozsah měření do 4 MPa.

2.2.3.6. Vlnocový tlakoměr [13]

Tlakoměrným elementem je tenkostěnný kovový plech umístěný v pouzdře. Tlak je možno přivádět z jedné nebo obou stran. Změnou uložení pružiny můžeme upravit tuhost a průběh charakteristiky. Používají se převážně u pneumatických regulačních systémů.

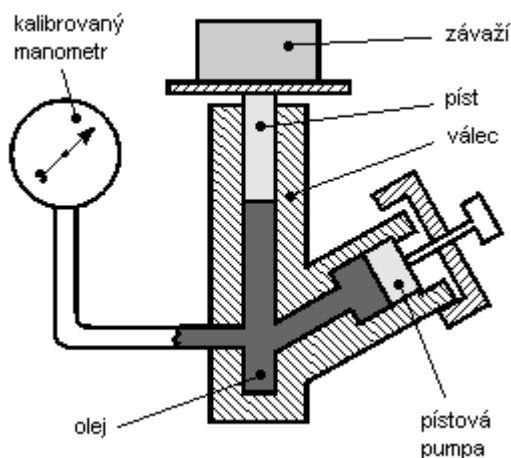
Deformační tlakoměry se vyrábí s přesností 2,5 % anebo 1 %. Jsou ovšem značně citlivé na přetížení a pružné elementy časem mění mechanické vlastnosti a je tedy nutné je často cejchovat. Jsou to lehká, jednoduchá a spolehlivá zařízení.



Obr. 3. 8 - Deformační tlakoměry: a) Bourdanova trubice, b) Membránový, c) Krabicový, d) Vlnocový [13]

2.2.3.7. Tlakoměry se silovým účinkem [13]

Převádí měření tlaku na měření síly, která je v silové rovnováze s tlakovou silou. Mezi tlakoměry se silovým účinkem patří tlakoměry pístové a prstencové. Pístový tlakoměr se používá hlavně pro cejchování ostatních manometrů, převážně v oblasti vyšších tlaků. Má vysokou přesnost měření a velký rozsah od 0,05 až do 2 000 MPa.



Obr. 3. 9 - Pístový tlakoměr využívaný pro kalibraci [13]

2.2.4. Měření příkonu [3]

Příkon se měří cejchovaným torzním nebo elektrickým dynamometrem vloženým mezi motor a hřídel čerpadla nebo cejchovaným elektromotorem spojeným přímo s čerpadlem. Výkon cejchovaného elektromotoru nesmí být větší jak dvojnásobek minimálního příkonu čerpadla v rozsahu, v němž má být měření spolehlivé. Z příkonu motoru a jeho ztrát se určí výkon motoru a příkon čerpadla, při čemž účinnost elektromotoru je nutno stanovit podle platných předpisů a norem ČSN.

Užitečný výkon čerpadla se vypočítá:

$$P_V = \rho \cdot Q \cdot Y \quad (2.3)$$

Příkon čerpadla P_P je výkon přenesený hnacím zařízením na hřídel čerpadla a je větší než užitečný výkon čerpadla o výkon spotřebovaný na ztráty v čerpadle, dále o příkon eventuálních pomocných zařízení (např. mazací čerpadla) odebíraný z hřídele. Předloha a spojka mezi motorem a hřídelí čerpadla se považuje za část hnacího zařízení.

2.2.5. Účinnost čerpadla [3]

Účinnost čerpadla se uvádí v procentech:

$$\eta_\epsilon = \frac{P_V}{P_P} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (2.4)$$

Tolerance pro průtok Q a účinnost η_ϵ jsou stanoveny normou.

2.2.6. Měření otáček [3]

Otáčky se měří zvlášť pečlivě počítadlem nebo vyzkoušeným otáčkoměrem za ustáleného chodu čerpadla. Měření stroboskopem není vhodné, protože zjištěné údaje závisí na frekvenci sítě. Je-li u odstředivých čerpadel rozdíl otáček větší než 5 % jmenovité hodnoty, přepočítává se průtok, dopravní výška a příkon podle afinních vztahů, přičemž se předpokládá, že účinnost zůstává neměnná.

3. Měření charakteristiky čerpadla [8]

Měření bylo prováděno na měřicím zařízení FM53 od firmy Armfield, které bylo připojeno k PC přes USB port. Data se vyhodnocovala v softwaru firmy Armfield. Při měření jsem postupoval podle návodu pro uvedené zařízení. Cílem bylo udělat tři měření: měření charakteristiky plunžrového čerpadla, P-V diagramu a určení objemové účinnosti.

3.1. Popis měřicího zařízení



Čerpadlo (1) – Plunžrové čerpadlo, jehož charakteristiku budu měřit. Je poháněno elektromotorem a k válci je připojen snímač tlaku. Poloměr pístu je $r = 16 \text{ mm}$ a jeho zdvih je $s = 15 \text{ mm}$. Z toho se dá určit jeho teoretický objem $V_t = \pi \cdot r^2 \cdot s = 12063,71 \text{ mm}^3$.

Nádrž (2) – Je vyrobena z průhledného akrylátu. Nádrž je naplňována vodou přes výtláčné potrubí. K nádrži je dále připojeno sací potrubí, které přivádí vodu do válce čerpadla.

Elektromotor (3) – Slouží k pohonu plunžrového čerpadla. Jedná se o třífázový čtyřpólový elektromotor s výkonem 250 W. Jeho rychlost otáček se reguluje v softwaru od firmy Armfield.

Průtokoměr (4) – Slouží k měření průtoku systému. Hodnota je sledována vzhledem k pulsacím průtoku, které vznikají z podstaty činnosti plunžrového čerpadla.

Snímač tlaku ve válci čerpadla (5) – Slouží k měření hodnoty tlaku přímo ve válci plunžrového čerpadla.

Snímač tlaku ve výstupním potrubí (6) – Slouží pro měření hodnoty tlaku ve výstupním potrubí.

Redukční ventil (7) – Ventil slouží pro nastavení ustáleného tlaku ve výtlačném potrubí, který působí jak zátěž čerpadla.

Pojistný ventil (8) – Ventil slouží pro zamezení překročení nejvyšší povolené hodnoty tlaku ve výtlačném potrubí. Ventil je nastavený na hodnotu 0,5 MPa.

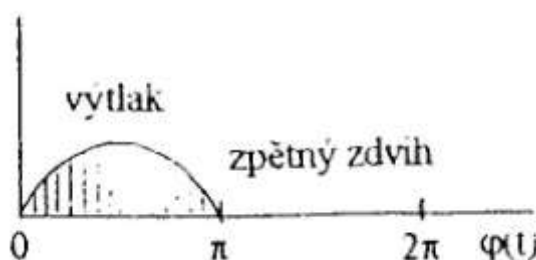
Vzdušník (9) – Je připojen do výtlačného potrubí prostřednictvím ventilu. Pokud je ventil uzavřen, nedochází k žádnému tlumení a můžeme měřit pulsace tlaku typické pro pracovní cyklus plunžrového čerpadla. Pokud připojíme vzdušník k systému, dojde k částečnému tlumení těchto pulsací. Přes ventilek v horní části vzdušníku lze měnit vnitřní tlak ve vzdušníku a tím i ovlivnit míru tlumení v systému.

3.2. Měření charakteristiky plunžrového čerpadla

Cílem měření je získat výslednou charakteristiku čerpadla pro jeho rozsah rychlosti a výstupní tlak.

3.2.1. Teorie

Závislost okamžitého objemového toku na poloze pístu během jedné otáčky je znázorněna v diagramu, ze kterého vyplývá, že průběh charakteristiky má sinusový tvar. Jednotlivé parametry jsou ve fázi nebo jsou fázově posunuté.



Obr. 3. 10 - Průběh tlaku ve válci čerpadla [14]

Z diagramu je vidět, že dodávka kapaliny je nerovnoměrná. Pulsující charakter průtoku je ale nežádoucí. Pulsace se dají zmírnit zařazením vzdušníku nebo zvýšením počtu válců.

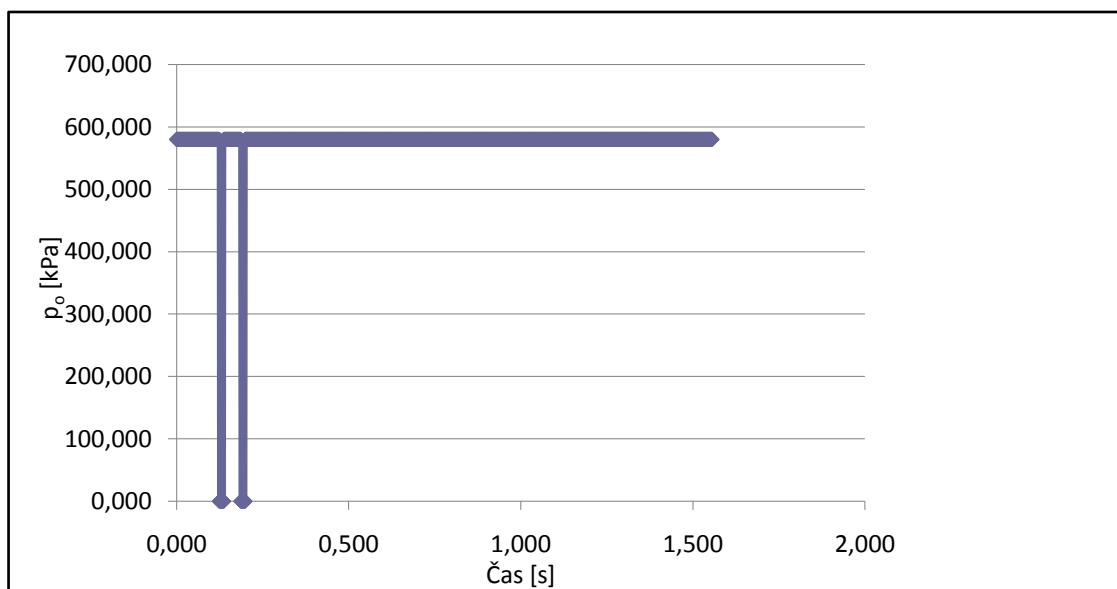
3.2.2. Postup měření

Po zapnutí čerpadla jsem nastavil otáčky na maximum a pro nulový tlak ve výtlačném potrubí a softwarem zaznamenal hodnoty. Na tlakovém ventilu jsem nastavil tlak na výtlačném potrubí přibližně 50 kPa. Hodnoty jsem opět nechal zapsat do softwaru. Měření jsem opakoval pro hodnoty tlaku na výtlačném potrubí 100, 200, 300 a 400 kPa. Následně jsem plně otevřel tlakový ventil a otáčky motoru snížil na 50 % a provedl měření pro všechny hodnoty tlaku jako v předchozím případě. Všechny výsledky jsem nechal softwarem převést do souboru Excel.

3.2.3. Výsledky

Výsledkem měření měli být dva grafy. První měl obsahovat závislost průtočného množství na čase a na druhé ose Y se měl nacházet výstupní tlak v potrubí. Druhý graf měl obsahovat sestrojenou závislost tlaku ve výstupním potrubí na čase a na druhé ose Y měla být vynesená hodnota tlaku ve válci.

Z naměřených hodnot jsem nebyl schopen vytvořit grafy očekávaných průběhu, z důvodu špatně naměřených výsledků. Tlak ve výtlačném potrubí vycházel až na výjimky konstantní, zdvih pístu také. Tlak ve válci vyšel záporný. Z těchto hodnoty by první graf vyšel takto:



Obr. 3. 11 - Graf naměřených hodnot

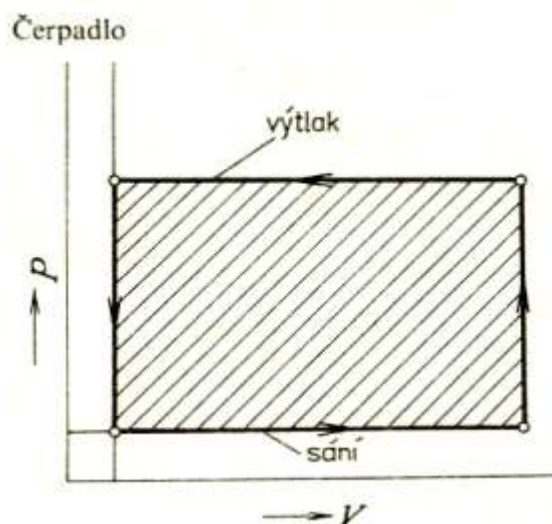
3.3.P-V diagram

Cílem měření bylo sestrojit P-V diagram plunžrového čerpadla.

3.3.1. Teorie

Jednotlivé práce cyklu čerpadla jsou:

1. Píst se zasouvá a nasává kapalinu do prostoru válce, jehož objem se zvětšuje.
2. Když píst dosáhne úvratě, objem činného prostoru ve válci je nejvyšší a tlak ve válci je nejnižší. Tlak ve válci se rovná tlaku v sacím potrubí.
3. Píst se vysouvá zpět do válce a vytlačuje kapalinu pryč z prostoru válce, jeho činný objem se snižuje.
4. Píst se nachází v úvrati, činný objem ve válci je nejnižší a tlak vzrostl na maximum. Tlak ve válci a tlak ve výstupním potrubí se rovnají.



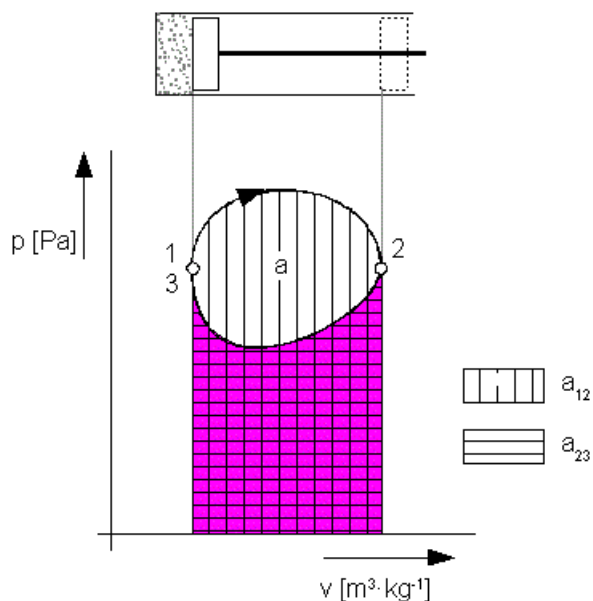
Obr. 3. 12 - Teoretický P-V diagram [13]

3.3.2. Postup měření

Po zapnutí čerpadla jsem nastavil otáčky na 100 %. Softwarem nechám zaznamenat všechny hodnoty při otevřeném tlakovém ventilu. Pro další měření jsem postupně uzavíral tlakový ventil na hodnoty tlaku na výtlačném potrubí 100, 300 a 400 kPa. Pro každou hodnotu tlaku jsem nechal zaznamenat výsledky. Měření jsem opakoval pro otáčky motoru nastavené na 50 %.

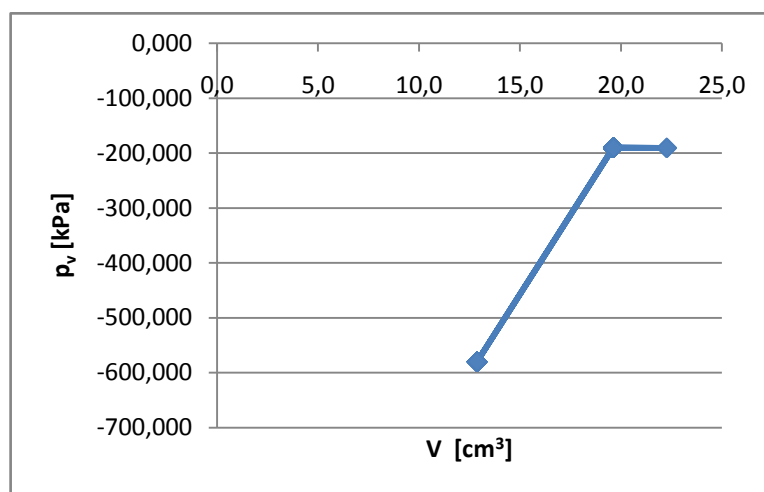
3.3.3. Výsledky

Výsledkem měl být graf skutečného P-V diagramu, který měl vypadat přibližně takto:



Obr. 3. 13 - Skutečný P-V diagram [15]

Graf jsem nebyl schopen vytvořit z důvodu špatných hodnot, v některých měřeních vycházel tlak záporný. Příklad grafu z naměřených hodnot:



Obr. 3. 14 - Graf naměřených hodnot

3.4. Objemová účinnost

Cílem měření je stanovit objemovou účinnost čerpadla při různých hodnotách otáček.

3.4.1. Teorie

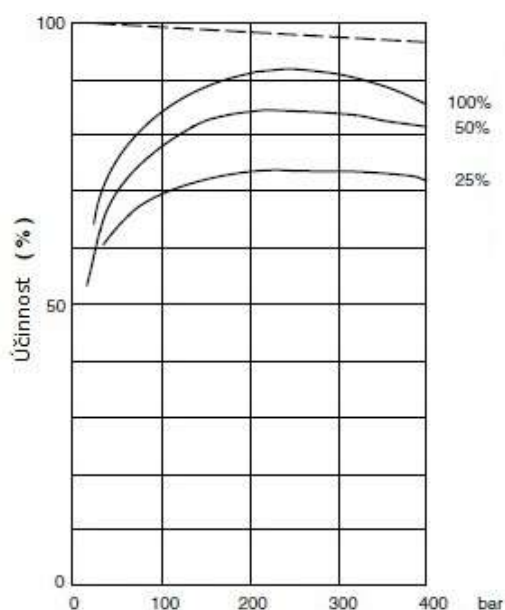
Objemovou účinnost můžeme definovat jako skutečné množství dopravené kapaliny za jeden zdvih k objemu, který vytlačí píst za jeden zdvih beze ztrát.

3.4.2. Postup měření

Po zapnutí čerpadla jsem nastavil jeho otáčky na maximum a programem nechal snímat jednotlivé veličiny. Poté jsem otáčky snížil na 90 % a nechal snímat všechny veličiny. Otáčky jsem postupně snižoval o 10 %, dokud jsem nedosáhnul 20 % otáček. Po každém snížení jsem začal snímat hodnoty. Toto měření jsem opakoval hodnoty tlaku na výtlačném potrubí 200, 300 a 400 kPa, které jsem nastavil na tlakovém ventilu.

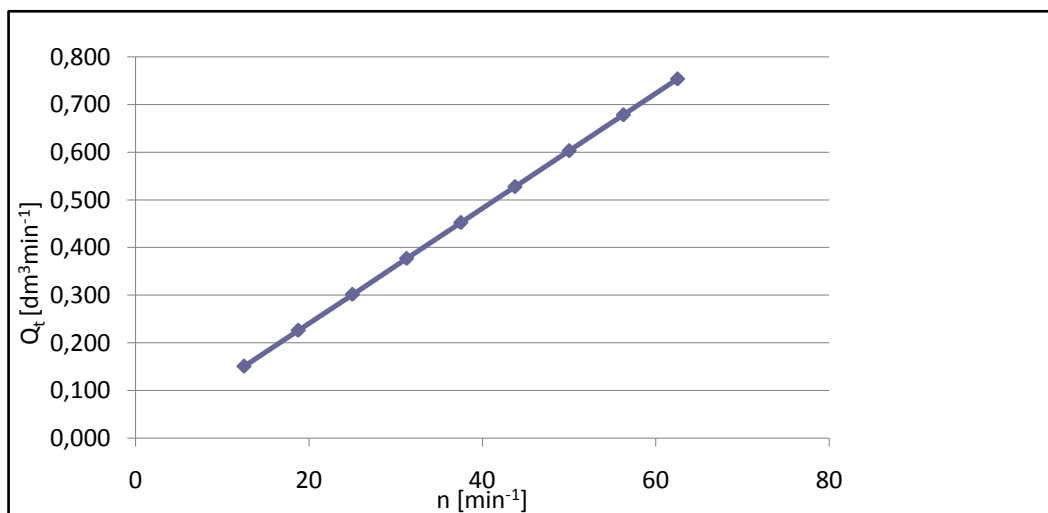
3.4.3. Výsledky

Výsledkem měl být graf, kde pro každé nastavení tlaku měla být vykreslena závislost objemové účinnosti na rychlosti motoru. Příklad takové závislosti je zde:

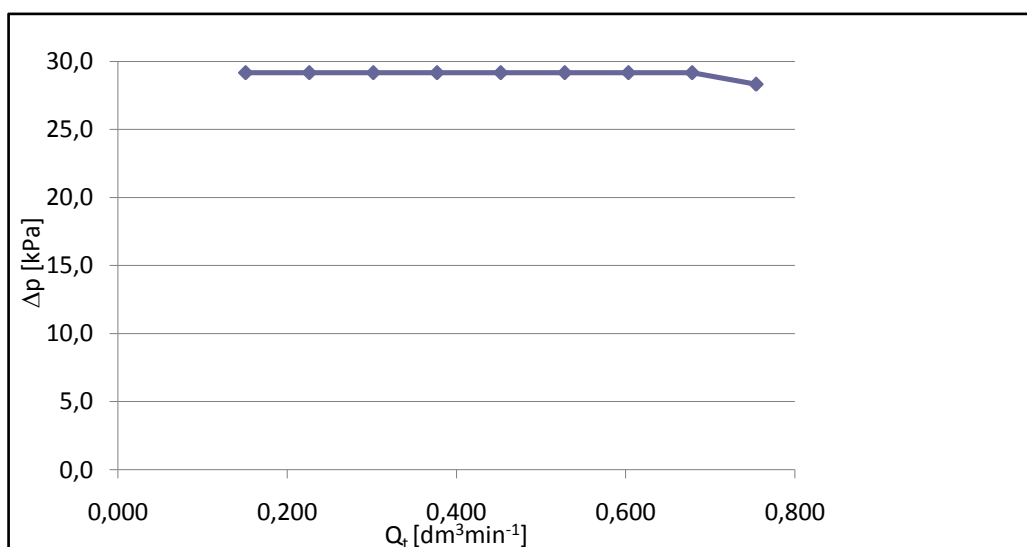


Obr. 3. 15 - Objemová účinnost čerpadla firmy Vickers

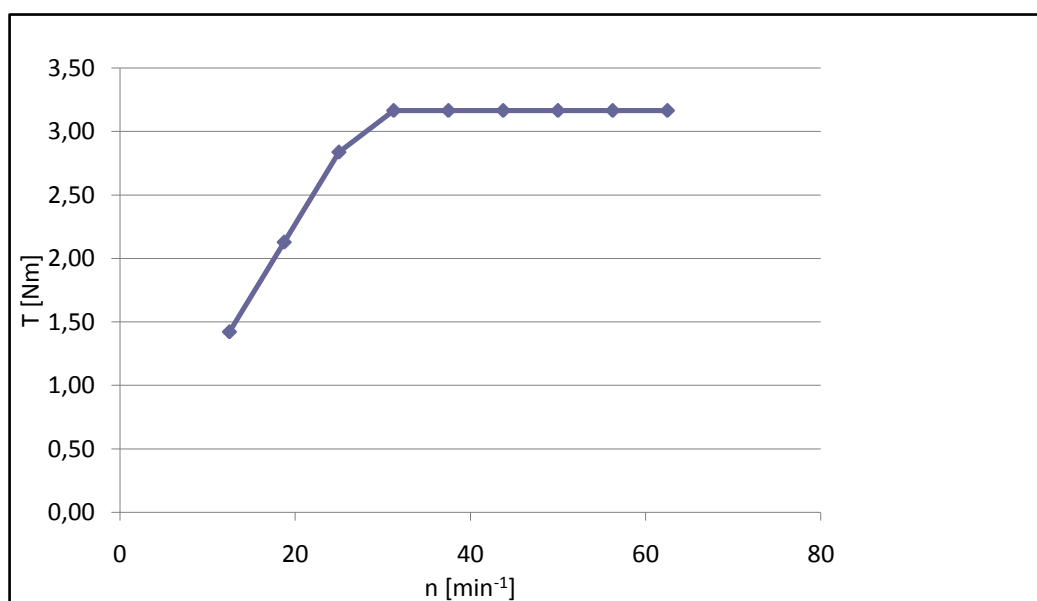
Z naměřených hodnot jsem nebyl schopen vytvořit graf závislosti objemové účinnosti na rychlosti motoru z důvodů špatných hodnot. Ve všech měřeních pro všechny tlaky mi vyšla objemová účinnost při 100 % otáčkách necelé jedno procento. Z naměřených hodnot v tomto měření jsem byl schopen vytvořit tyto grafy závislostí.



Obr. 3. 16 - Graf závislosti teoretického průtoku na otáčkách



Obr. 3. 17 - Graf závislosti rozdílu tlaků na teoretickém průtoku



Obr. 3. 18 - Graf závislosti momentu na otáčkách

Závěr

Na počátku této práce jsem prošel rozdělení čerpadel, kde jsem se nejdříve zaměřil na čerpadla hydrostatická. Jejich celek jako základní skupina se rozděluje na dvě základní podskupiny podle druhu pohybu, který čerpadla vykonávají. Postupně jsem probral každé základní používané čerpadlo, stručně popsal jejich princip funkce, uvedl některé jejich základní a důležité parametry a vypsali možnosti jejich použití v praxi. Snažil jsem se co nejvíce pozornosti věnovat plunžrovým čerpadlům, neboť na nich se převážně zakládá tato práce.

Dále jsem se věnoval čerpadlům hydrodynamickým. Nejdříve jsem probral jejich nejpodstatnější prvek a tím je jejich oběžné kolo. To se dělí podle rozsahu měrných otáček a dále jsem ukázal rozdíl mezi základními typy rozváděčů a to lopatkovými a spirálními bezlopatkovými. Následně jsem stručně popsal několik základních hydrodynamických čerpadel. V poslední části první kapitoly jsem se věnoval čerpadlům speciálním, u kterých jsem popsal rozdíl oproti konvenčním čerpadlům a rozebral několik jejich nejpoužívanějších zástupců.

Ve druhé kapitole této práce jsem se věnoval charakteristickým vlastnostem čerpadel a způsobu jejich měření a vyhodnocení. Nejdříve jsem popsal základní charakteristické vlastnosti čerpadel a poté se věnoval způsobu měření a vyhodnocení každé z nich. U nejdůležitějších vlastností jsem probral i nejzákladnější a nejpoužívanější přístroje pro jejich měření.

V poslední kapitole jsem se věnoval měření, které jsem prováděl na školním demonstračním zařízení FM53 firmy Amrfield. Pomocí dostupného návodu pro zacházení s tímto zařízením, jsem postupně provedl tři základní měření a to měření charakteristiky plunžrového čerpadla, jeho P-V diagramu a nakonec jeho objemové účinnosti. Při měření jsem postupoval přesně podle pokynů v návodu, ale měření nebylo úspěšné. Ze zadaných hodnot nebylo možné vytvořit potřebné grafy. Hodnoty ve většině případech vycházely jako konstanty. Účinnost čerpadla vyšla téměř nulová a tlaky spolu se zdvihem píst v některých měřeních vycházely záporné. Z toho usuzuji, že bude nejspíš poškozená měřicí karta systému.

Seznam použité literatury

- [1] BRADA, K., BLÁHA, J.: *Hydraulické stroje*. 1. vydání. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1992. 752s. ISBN 80-03 006655-1
- [2] MELICHAR, J., BLÁHA, J., BRADA, K.: *Hydraulické stroje: Konstrukce a provoz*. 1. vydání. ČVUT Praha, 2002. 378s. ISBN 80-01-02657-4
- [3] BOJKO, M., KOZUBKOVÁ, M., RAUTOVÁ, J.: *Základy hydromechaniky a zásobování hasiv*. 1. vydání. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2008. 197s. ISBN 978-80-7385-033-3
- [4] NESBITT, B.: *Handbook of Pumps and Pumping: Pumping Manual International*. [UK]. Elsevier, 2006. 470s. ISBN 185617476X
- [5] *AxFlow* [online]. c2009. [cit. 2012-05-16]. URL: <http://www.axflow.com/cz/cz/>
- [6] *PressureJet* [online]. c2008. [cit. 2012-05-16]. URL: <http://www.pressurejet.com/>
- [7] *Hughes pumps* [online]. [cit. 2012-05-16]. URL: <http://www.hughes-pumps.co.uk/index.asp>
- [8] ZAVADIL, L.: *Týmová cvičení z čerpací techniky*, 1. vydání. Vysoká škola báňská – technická univerzita Ostrava, 2011. 128s.
- [9] *Wikimedia commons* [online]. c2013. [cit. 2012-05-16]. URL: http://commons.wikimedia.org/wiki/Main_Page
- [10] *Pístová čerpadla* [online]. [cit. 2012-05-16]. URL: <http://ole.wz.cz/honza/5-P%C3%ADstov%C3%A9%20%C4%8Derpadla.htm>
- [11] JIROUT, T.: *Doprava tekutin – čerpadla*. [document pdf].
- [12] *TBZ-info* [online]. c2013. [cit. 2012-05-16]. ISSN 1801-4399. URL: <http://www.tzb-info.cz/4624-mereni-prutoku-tekutin-principy-prutokomeru>
- [13] *e-automatizace* [online]. [cit. 2012-05-16]. URL: http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmv/ramce_uvod.htm
- [14] *eAMOS* [online]. c2013. [cit. 2012-05-16]. URL: http://eamos.pf.jcu.cz/amos/kat_fyz/modules/low/kurz_text.php?id_kap=15&kod_kurzu=kat_fyz_7356
- [15] *Transformační technologie* [online]. [cit. 2012-05-16]. ISSN 1804-8293. URL: <http://www.transformacni-technologie.cz/tepelne-obehy-a-jejich-realizace.html>